

UNIVERSIDADE DE LISBOA

Instituto de Educação



**O PAPEL DO DESENHO NA CONSTRUÇÃO DE EXPLICAÇÕES CIENTÍFICAS  
ACERCA DE FENÓMENOS DA QUÍMICA: UM ESTUDO COM ALUNOS DO 8.º ANO**

**Vanessa Figueiredo Pereira de Andrade**

Orientadores: Professora Doutora Mónica Luísa Mendes Baptista  
Professora Doutora Ana Sofia Martins Silva Freire dos Santos Raposo

Tese especialmente elaborada para a obtenção do grau de Doutor em Educação,  
especialidade de Didática das Ciências.

2023



# UNIVERSIDADE DE LISBOA

Instituto de Educação



## **O PAPEL DO DESENHO NA CONSTRUÇÃO DE EXPLICAÇÕES CIENTÍFICAS ACERCA DE FENÓMENOS DA QUÍMICA: UM ESTUDO COM ALUNOS DO 8.º ANO**

**Vanessa Figueiredo Pereira de Andrade**

Orientadores: Professora Doutora Mónica Luísa Mendes Baptista

Professora Doutora Ana Sofia Martins Silva Freire dos Santos Raposo

Tese especialmente elaborada para a obtenção do grau de Doutor em Educação, especialidade de Didática das Ciências;

Júri:

Presidente: Doutora Cecília Galvão Couto, Professora Catedrática e membro do Conselho Científico do Instituto de Educação da Universidade de Lisboa.

Vogais:

- Doutora Ana Sofia Cavadas Afonso, Professora Auxiliar do Instituto de Educação da Universidade do Minho;
- Doutor Joaquim Bernardino Oliveira Lopes, Professor Associado com Agregação da Escola de Ciências e Tecnologia da Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro;
- Doutor Pedro Guilherme Rocha dos Reis, Professor Associado com Agregação do Instituto de Educação da Universidade de Lisboa;
- Doutora Mónica Luísa Mendes Baptista, Professora Associada do Instituto de Educação da Universidade de Lisboa.

Este trabalho foi financiado pelo programa de bolsas de doutoramento da FCT—  
Fundação para a Ciência e Tecnologia (SFRH/BD/119701/2016).





## Resumo

As atuais reformas na educação em ciência têm vindo a sublinhar a importância para a prática de construir explicações científicas. Quando envolvidos na construção de explicações científicas, os alunos são levados a raciocinar de forma mecanicista, ou seja, a raciocinar de forma sistemática sobre os fatores e relações subjacentes ao fenómeno a que dão origem e que permitem explicar como e porquê este ocorre. No entanto, na construção de explicações científicas acerca de fenómenos complexos, como os da química os alunos enfrentam desafios. Explicar fenómenos da química requer considerar entidades invisíveis como átomos e moléculas, que participam em complexos processos emergentes responsáveis pelo comportamento macroscópico do fenómeno. Um raciocínio complexo como este requer substancial apoio e prática. Considerando as características inerentes aos fenómenos da química que envolvem níveis escalares impossíveis de observar diretamente, as representações visuais e, em particular, as representações visuais criadas pelos alunos, e.g., a criação de desenhos, têm sido reconhecidas pelo seu potencial para apoiar os alunos a aprender em química. Com efeito, esta tese tem como objetivo conhecer de que forma a criação e uso de desenhos pode apoiar a construção de explicações científicas relacionadas com os fenómenos da química. Com esse objetivo foram desenvolvidos três estudos. O primeiro estudo teve como objetivo desenvolver um sistema de análise para caracterizar as explicações dos alunos e conhecer a natureza das explicações que alunos do 8.º ano constroem. O segundo estudo teve como objetivo examinar o progresso dos desenhos e explicações dos alunos após a implementação de uma estratégia didática com base na criação de desenhos para apoiar a construção de explicações científicas. O terceiro estudo teve como objetivo compreender como o raciocínio mecanicista dos alunos, necessário à construção de explicações, emerge e é concretizado quando envolvidos na criação conjunta de desenhos, bem como explorar o papel do desenho para estabelecer e moldar as interações sócio-cognitivas que ocorrem em torno da criação de desenhos.

Os principais resultados destes estudos mostraram que inicialmente as explicações dos alunos tendem a ser superficiais e incompletas, i.e., descrevem o que acontece, mas não relatam ou relatam de forma incompleta e fragmentada os mecanismos pelos quais acontecem. Contudo, quando envolvidos numa estratégia com base na criação e uso de desenhos para apoiar a construção de explicações científicas, as explicações incompletas dos alunos evoluem para relatos mais coerentes e mecanismos mais completos. Adicionalmente, ao explorar o papel do desenho através de uma micro-análise multimodal, mostraram-se algumas das formas únicas como o desenho pode apoiar a construção de explicações científicas. O desenho funcionou i) como "porta-de-entrada" para os alunos raciocinarem de forma mecanicista sobre um fenómeno que tentam explicar e na concretização desta forma de pensar; e ii) como facilitador de processos colaborativos, ajudando a estabelecer um verdadeiro espaço de ação compartilhado, e permitindo o raciocínio coletivo em ação, facilitando a comunicação. Conclui-se com a posição de que criar um desenho é um processo que se estende para lá do ato de criar uma ferramenta

para pensar e comunicar. É, assim, o ato de pensar e comunicar em si mesmo; e deve ser estudado e usado na sala de aula como tal.

**Palavras Chave:** Explicações científicas; Criação de desenhos; Raciocínio mecanicista; Natureza corpuscular da matéria; Reações químicas

## Abstract

Current science education reform efforts have called for the practice of constructing scientific explanations. Through this practice, students engage in mechanistic reasoning, that is, in systematic reasoning about the underlying factors and relationships that give rise to a phenomenon to explain how and why it occurs. Constructing explanations for chemical phenomena presents particular challenges for students. Explaining a chemical phenomenon requires considering invisible entities, such as atoms and molecules, participating in complex emergent processes that are responsible for the macroscopic behaviour of the phenomenon. To achieve such complex reasoning, students must be provided with rather extensive support and practice. Considering the inherent features of chemistry, dealing with scales that are impossible to see, visual representations and, in particular, student-created visual representations, e.g., drawing, have been recognised as a way to support learning in chemistry. Thus, this dissertation aimed to understand the role that drawing plays to support students' explanations. With this aim in mind, three studies were developed. The first study aimed to develop a system of analysis to characterise students' explanations and to know the nature of the 8th-grade students' explanations. The second study aimed to examine the progress of student's drawings and explanations, subsequent to being involved in an instructional strategy that explicitly uses drawing as tool to support the construction of scientific explanations. The third study aimed to understand how students' mechanistic reasoning emerges and it is enacted when students are jointly engage in drawing creation, as well as to explore the role that drawing plays in establishing and shaping the social-cognitive interaction among students.

The main results revealed that students' initial explanations tend to be superficial and incomplete accounts—accounts describing what happens without providing a mechanism for how and why it happens or providing an incomplete mechanism. However, students' incomplete explanations evolved into more coherent and complete accounts when involved in creating and using drawings to support the construction of their explanations. Additionally, by exploring the role of drawing through a multimodal micro-analysis, some of the distinct ways that drawing supports students' mechanist reasoning and explanations were shown. These ways were, i) drawing provides a doorway to mechanistic reasoning and to enact this way of reasoning about the phenomenon under explanation; ii) drawing facilitates collaborative processes, specifically helping to establish a genuine shared-action space and enabling collective reasoning-in-action and by simplifying communication. This dissertation demonstrates the importance of encouraging the practice of explanation construction and mechanistic reasoning and the role of drawing to help students succeed in this practice. To conclude, it is argued that drawing is not an act ( of creating a tool) that helps to think or communicate, it is rather an act of thinking and communication in itself, and must be studied and used as such.

**Key-words:** Scientific explanations; Student-created drawings; Mechanistic reasoning; Particulate nature of matter; Chemical reactions.



# Índice

|                                                                                                                                                      |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 1   Introdução                                                                                                                                       | 1   |
| 1.1   Objetivo e questões de investigação                                                                                                            | 5   |
| 1.2   Organização da tese                                                                                                                            | 6   |
| 2   Enquadramento Teórico                                                                                                                            | 7   |
| 2.1   Explicações científicas na educação em ciência                                                                                                 | 7   |
| 2.2   Explicações científicas: raciocínio mecanicista                                                                                                | 8   |
| 2.3   Raciocínio mecanicista na química                                                                                                              | 11  |
| 2.4   Representações visuais na educação em ciência                                                                                                  | 12  |
| 2.5   Representações visuais criadas pelos alunos: o desenho                                                                                         | 14  |
| 2.6   Criação de desenhos: cognição distribuída e incorporada                                                                                        | 17  |
| 3   Fundamentação metodológica                                                                                                                       | 20  |
| 3.1   Metodologia mista                                                                                                                              | 20  |
| 3.2   Desenho geral da investigação                                                                                                                  | 21  |
| 3.3   Procedimentos éticos                                                                                                                           | 24  |
| 4   Apresentação dos Estudos                                                                                                                         | 27  |
| 4.1   Estudo I – Explicações científicas dos alunos: um sistema de análise                                                                           | 27  |
| 4.2   Estudo II – O uso de desenhos na construção de explicações científicas: um estudo com alunos do 8.º ano                                        | 40  |
| 4.3   Estudo III – Raciocínio mecanicista em prática: o papel do desenho                                                                             | 52  |
| 5   Discussão                                                                                                                                        | 66  |
| 5.1   Q11: Qual a natureza das explicações científicas que alunos do 8.º ano constroem?                                                              | 66  |
| 5.2   Q12: Que desenhos criam os alunos e que explicações constroem após envolvidos numa estratégia didática baseada na criação e uso de desenhos?   | 69  |
| 5.3   Q13: Como a criação e uso de desenhos apoia o raciocínio mecanicista dos alunos necessário à construção de "melhores" explicações científicas? | 72  |
| 5.4   Implicações                                                                                                                                    | 79  |
| 6   Conclusão                                                                                                                                        | 85  |
| Referências                                                                                                                                          | 86  |
| Anexo I   Artigo I                                                                                                                                   | 100 |
| Anexo II   Artigo II                                                                                                                                 | 125 |

|                        |     |
|------------------------|-----|
| Anexo III   Artigo III | 149 |
| Anexo IV   Artigo IV   | 176 |

## **Índice de figuras**

|                                                                                                      |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 2. Diagrama do desenho da investigação.                                                       | 22 |
| Figura 3. Momentos de recolha de dados do Estudo II.                                                 | 47 |
| Figura 4. Sequência de atividades em que os alunos participantes estiveram envolvidos no Estudo III. | 54 |
| Figura 5. Imagem da área de trabalho dos alunos na recolha de dados do Estudo III.                   | 56 |
| Figura 6. Imagem da timeline de edição.                                                              | 57 |
| Figura 7. Exemplo de um excerto da transcrição multimodal.                                           | 59 |

## **Índice de tabelas**

|                                                                                    |    |
|------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1   Caracterização sumária das escolas, professoras e alunos participantes. | 35 |
| Tabela 2   Síntese de resultados relativos ao primeiro objetivo do Estudo III.     | 62 |
| Tabela 3   Síntese de resultados relativos ao segundo objetivo do Estudo III.      | 64 |

Nas últimas décadas, a investigação e documentos normativos para a educação em ciência (e.g., CE, 2007; Duschl, 2008; NGSS, 2013; NRC, 2012; Osborne, 2014; Osborne & Dillon, 2008) têm apelado para uma maior ênfase nas práticas da ciência. O objetivo é tornar os conteúdos da ciência mais acessíveis e promover a compreensão epistémica e a apreciação da natureza da ciência. Por práticas científicas, entende-se os processos que têm lugar durante as descobertas científicas e incluem, entre outras: colocar questões e definir problemas; desenvolver e usar modelos, planejar e realizar investigações, construir explicações e argumentar com base em evidências (NRC, 2012). Colocar a ênfase nas práticas da ciência, é valorizar uma aprendizagem da ciência que não se esgota na simples aprendizagem de factos, conceitos, teorias e leis; mas que também envolve a compreensão dos seus processos e aspetos epistémicos (Evagorou, Erduran, & Mäntylä, 2015).

Em linha com os esforços atuais de trazer as práticas científicas para a sala de aula de ciências, documentos curriculares como as *New Generation Science Standards* (NGSS, 2013), estabelecem a construção de explicações como uma de oito práticas científicas centrais à aprendizagem das ciências e a integração do raciocínio mecanicista como um conceito disciplinar transversal essencial a essa prática. Não obstante, a construção de explicações científicas tem sido uma das práticas que menos atenção tem recebido na educação em ciência (Rönnebeck, Bernholt, & Ropohl, 2016; Taber, 2019). Face a esta lacuna, esta tese foca-se na construção de explicações científicas que integram o raciocínio mecanicista, como uma forma de raciocinar sistematicamente através dos fatores subjacentes pelos quais um fenómeno ocorre (NRC, 2012; Quinn, 2016).

Apesar de nos últimos anos se ter vindo a assistir a um maior número de estudos acerca da prática de construir explicações científicas, esses estudos caracterizam-se por uma grande diversidade e falta de clareza quanto ao que se entende por uma explicação científica (Taber, 2019). Mais especificamente, apresentam diferentes perspetivas quanto à natureza conceptual de uma explicação e consequentemente ao que consideram como uma "boa" explicação (Braaten & Windschitl, 2011; Yeo & Gilbert, 2014; Rottman & Keil, 2011; Talanquer, 2010). Alguns autores têm abordado a construção de explicações sob a perspetiva do referencial conceptual de um argumento (e.g., McNeill et al., 2006; Ruiz-

Primo, Tsai, & Schneider, 2010; Songer & Gotwals, 2012); outros focado a estrutura linguística de uma explicação (e.g., Tang, 2016); outros prestado atenção às diferentes funções de uma explicação (Gilbert, Boulter, & Rutherford, 1998a, 1998b); outros aos tipos de relações causais que nelas são estabelecidas (e.g., Brewer, Chinn, & Samarapungavan, 1998; Grotzer, 2003; Russ et al., 2008); outros, ainda, à explicação como forma de comunicar a compreensão de algo (e.g., Kulgemeyer & Schecker, 2013). Esta diversidade de estudos tem tornado difícil identificar e caracterizar de forma consistente a natureza das explicações científicas que os alunos constroem, os conhecimentos que mobilizam, as heurísticas que usam, as dificuldades que experienciam; bem como delinear estratégias didáticas e identificar possíveis ferramentas que possam apoiar os alunos a construir as suas próprias explicações. De facto, poucos estudos apresentam uma definição operacional clara para explicação científica (Rönnebeck et al., 2016; Taber, 2019); e mais escassos os que identificam as dimensões de uma "boa" explicação científica (e.g., Russ et al., 2008; Tang, 2016). Contribuir para preencher esta lacuna foi um dos objetivos desta tese.

Adicionalmente, é reconhecido que a prática de construir explicações, em que os alunos raciocinam sobre os mecanismos subjacentes que dão origem aos fenómenos, envolve competências complexas ao nível cognitivo, epistémico, linguístico, e semiótico (Braaten & Windschitl, 2011; Cooper, 2015; McCain, 2015). A literatura mostra que frequentemente as explicações dos alunos se caracterizam por relatos superficiais que não possuem a componente de raciocínio desejável (Bolger et al., 2012; Grotzer & Tutwiler, 2014; Talanquer, 2018b). Com efeito, não é expectável que os alunos evoluam de relatos simples descrevendo os padrões observáveis de um fenómeno, para relatos complexo de como o fenómeno ocorre e porque se comporta desse modo, sem um apoio substancial e um envolvimento continuado com esta prática (Bolger et al., 2012; Cooper, 2015). No entanto, poucos estudos têm proposto estratégias para apoiar os alunos na construção de explicações científicas (Tang, 2016). Assim, neste trabalho procurou-se desenhar uma estratégia didática para apoiar os alunos na construção das suas explicações científicas. Daqui surgiu um outro interesse que foi explorar possíveis ferramentas que pudessem fornecer aos alunos o apoio conceptual, cognitivo e epistémico necessário à construção das suas explicações. Este objetivo, conduziu a uma outra área da investigação na educação em ciência até à data pouco explorada: o desenho ou a criação de representações visuais através do desenho.



No âmbito deste trabalho, define-se desenho simplesmente como a criação propositada pelo aluno de qualquer representação visual externa, estática de duas dimensões em papel e lápis, representando qualquer tipo de elemento, seja estrutura, relação ou processo (Forbus & Ainsworth, 2017; Quillin & Thomas, 2015). Neste sentido, o desenho pode incluir diagramas ou esboços, sendo os primeiros mais completos e estruturados e os últimos mais incompletos e exploratórios.

De forma geral, a ideia do desenho na educação em ciência é motivada pela combinação de duas importantes perspectivas. A primeira é que o uso de representações visuais pode levar a melhorias na aprendizagem e compreensão de conceitos, sobretudo de conceitos complexos como aqueles ligados à química que envolvem considerar estruturas submicroscópicas, como átomos e moléculas (e.g., Akaygun & Jones, 2013; Olympiou, Zacharias, & deJong, 2013; Wu & Karjick, 2001). A segunda, e mais recente, é que envolver os alunos na criação dessas representações visuais, ao contrário de usarem representações fornecidas, traz benefícios adicionais associados ao próprio processo da sua criação (Ainsworth, Prain, & Tytler, 2011; Chi & Wylie, 2014; Evagorou et al., 2015; Forbus & Ainsworth, 2017; Parnafes, 2010, 2012). No âmbito desta tese, o interesse é no desenho como processo de criação de representações visuais que podem apoiar a aprendizagem; mais especificamente, a compreensão e explicação de fenómenos da química relacionados com a natureza corpuscular da matéria e as reações químicas. A investigação neste campo é ainda embrionária, contudo, alguns estudos empíricos vêm notando aspetos da criação de desenhos que se mostram promissores para apoiar os alunos na construção de explicações.

A criação de um desenho permite criar representações visuais de entidades, concretas, mas que existem numa escala não acessível à nossa dimensão (e.g., átomos e moléculas) ou abstractas, i.e., que não existem como representação visual, mas que podem ser traduzidas como tal (e.g., energia, colisões, som, etc.) (Evagorou et al., 2015). Quando envolvidos neste processo, os alunos são levados a tomar decisões sobre como representá-las, criando um contexto fértil para explorar ideias, identificar inconsistências, colocar questões e propor novas ideias. Adicionalmente, criar um desenho produz um artefacto público que pode ser visualmente examinado pelo próprio e por outros (Tversky & Suwa, 2009). Ao (re)examinarem o desenho criado, os alunos podem então revê-lo e discuti-lo. Neste processo, criam-se oportunidades para eventualmente detetar e rever contradições e

gerar novas ideias e entendimentos (Bobek & Tversky, 2016; Chang, Quintana, & Krajcik, 2014). Na construção de explicações que envolvem raciocinar sobre os mecanismos que dão origem a um fenómeno, e mais especificamente no caso da química em que esses mecanismos se situam ao nível submicroscópico, acredita-se que a criação de desenhos possa conduzir a explicações mais complexas, considerando mais entidades, inferindo mais possíveis relações e testando a sua coerência interna e externa (Chang et al., 2014).

Embora pareça haver boas razões para considerar a criação e uso de desenhos numa estratégia para apoiar a construção de explicações científicas (Ainsworth et al., 2011; Chi & Wylie, 2014; Forbus & Ainsworth, 2017; Parnafes, 2010), pouco se sabe acerca do papel do desenho neste processo. Por exemplo, não é claro como os alunos criam os seus desenhos e como os usam para pensar; ou se existe uma associação entre certos elementos representados no desenho e determinadas heurística que os alunos aplicam para raciocinar acerca de um mecanismo subjacente; ou, por exemplo, quando e como a interação entre pares é uma componente importante no desenho (Cooper, Stieff, & DeSutter, 2017).

Assim, com o intuito de contribuir para uma compreensão mais profunda do papel do desenho na construção de explicações científicas e no raciocínio mecanicista dos alunos, adotou-se a perspectiva das teorias da cognição distribuída e incorporada. A cognição distribuída e incorporada ao contrário de formas de cognição, são perspetivas sobre a cognição, que “assumem que os processos cognitivos são sempre distribuídos de alguma forma” (Hutchins, 2006, p. 376) e que as ações incorporadas num meio material são centrais a estes processos (Barsalou, 2008). Isto implica que os alunos, quando envolvidos na criação de um desenho, formam um sistema cognitivo que compreende a si mesmos, os desenhos que criam e suas ações comunicativas e incorporadas no desenho (Hutchins, 2014). Desta forma, compreender o papel do desenho na construção de explicações, requer considerar o desenho como parte integrante do ambiente onde é criado e usado (Hutchins, 2006; Osbeck & Nersessian, 2014; Zhang, 1997).

Em suma, nesta tese pretende-se contribuir para aumentar o conhecimento em duas áreas promissoras que carecem de maior investigação—a prática de construir explicações científicas e a criação de representações visuais através do desenho—e para melhor compreender a forma como interagem, segundo a perspectiva da cognição distribuída e

incorporada que tem sido pouco considerada na explicação de fenómenos relacionados com a aprendizagem em ciência.

## 1.1 | Objetivo e questões de investigação

A presente tese tem como objetivo principal compreender o papel do desenho na construção de explicações científicas acerca de fenómenos relacionados com a natureza corpuscular da matéria e as reações químicas. Especificamente, pretendeu-se responder às seguintes questões de investigação (QI):

QI1. Qual a natureza das explicações científicas que alunos do 8.º ano de escolaridade constroem? Responder a esta questão envolveu a concretização dos seguintes objetivos:

- a. Desenvolver um sistema de análise que permita caracterizar de forma sistemática as explicações científicas dos alunos.
- b. Utilizar o sistema desenvolvido para analisar e caracterizar as explicações científicas que os alunos do 8.º ano de escolaridade constroem.

QI2. Que desenhos criam os alunos e que explicações constroem após envolvidos numa estratégia didática baseada na criação e uso de desenhos para apoiar a construção de explicações científicas? Responder a esta questão envolveu a concretização dos seguintes objetivos:

- a. Analisar e comparar os desenhos e as explicações que os alunos criam antes e após a estratégia didática baseada na criação e uso de desenhos.
- b. Examinar a associação entre os desenhos e as explicações dos alunos antes e após a estratégia didática baseada na criação e uso de desenhos.

QI3. Como a criação e uso de desenhos apoia o raciocínio mecanicista dos alunos necessário à construção de explicações científicas? Responder a esta questão envolveu a concretização dos seguintes objetivos:

- a. Compreender como o raciocínio mecanicista dos alunos emerge e é concretizado na criação colaborativa de desenhos para explicar um fenómeno.
- b. Explorar as interações sócio-cognitivas que ocorrem em torno da criação colaborativa de desenhos: como são estabelecidas e moldadas.

## 1.2 | Organização da tese

Para responder às questões de investigação apresentadas na subsecção anterior foram realizados três estudos empíricos. Os três estudos realizados deram origem a quatro artigos publicados em revistas científicas na área da investigação em educação. A Figura 1 apresenta sequencialmente os estudos realizados e os respectivos artigos a que deram origem.

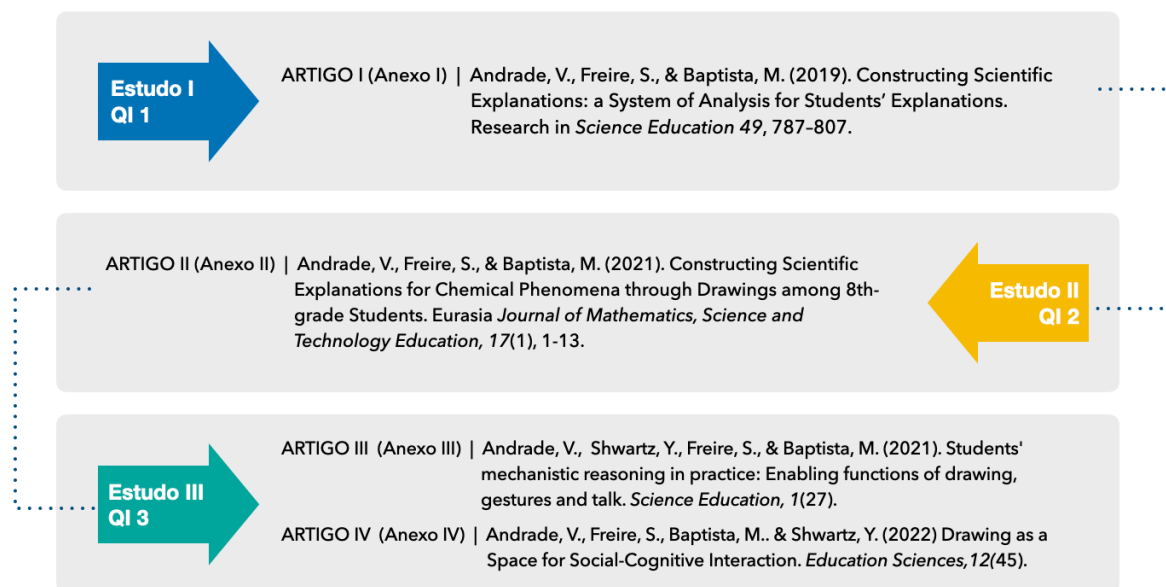


Figura 1. Sequência dos estudos empíricos que compõem a tese e respetivos artigos a que deram origem.

Esta tese está organizada em seis secções. Na secção 2—*Enquadramento teórico*—apresenta-se os fundamentos teóricos que informaram e justificaram a elaboração da tese com base nos trabalhos seminais e empíricos relevantes para a sua área de estudo. Na secção 3—*Fundamentação metodológica*—fundamenta-se a abordagem metodológica considerada para guiar os estudos empíricos que compreendem esta tese, apresenta-se o desenho geral da investigação e descrevem-se os procedimentos éticos seguidos. Na secção 4—*Estudos*—apresenta-se os Estudos I-III, que constituem a parte empírica da tese, mais especificamente os seus racionais, objetivos, métodos e principais resultados. Na secção 5—*Discussão*—discute-se os resultados dos Estudos I-III dando respostas às respetivas questões de investigação. Nesta secção discute-se ainda as implicações para a investigação educacional e para a prática. Por fim, na secção 6, apresenta-se a *conclusão* da tese.

## 2 | Enquadramento Teórico

---

### 2.1 | Explicações científicas na educação em ciência

Atualmente a educação em ciência vem sublinhando a ideia de envolver os alunos em práticas que reflitam as autênticas práticas da ciência (Duschl, 2008; NGSS, 2013; NRC, 2012). Sendo a construção de explicações uma das práticas fundamentais da ciência, a investigação nesta área tem vindo a tomar maior expressão, afirmando-se sobretudo durante a última década (McNeill et al., 2006; Papadouris, Vokos, & Constantinou, 2017; Tang, 2016; Wagner, Kok, & Priemer, 2020; Zangori & Forbes, 2014). Todavia, nem sempre reunindo consenso quanto ao que conta como uma explicação científica no contexto da educação em ciência (Osborne & Patterson, 2011). Diferenças existem, em particular, nas perspetivas acerca das práticas epistémicas que contribuem para o objetivo final de explicar um fenómeno natural (Tang, Elby, & Hammer, 2020). Neste sentido, dois tipos de práticas podem ser distinguidas, a que se foca na procura empírica de padrões e a que se foca na construção de relatos teóricos dos mecanismos subjacentes aos fenómenos da natureza. Por exemplo, investigar se a temperatura afeta o estado físico de uma determinada substância centra-se na observação e descrição de um padrão num fenómeno (McNeill et al., 2006; Songer & Gotwals, 2012). No entanto, investigar como e porquê a temperatura afeta o estado físico de uma substância centra-se na procura dos mecanismos pelos quais os padrões observados emergem e se comportam (NRC, 2012); implica pensar em possíveis causas e efeitos, suas relações, preencher lacunas e conciliar possíveis inconsistências (Kapon, 2017; Russ et al., 2008; Odden & Russ, 2019).

Alguns autores têm vindo a sublinhar estas diferentes perspetivas. Por exemplo, Osborne e Patterson (2011) abordam-na como a diferença entre a elaboração de um argumento com base em evidências e a construção de uma explicação. Para Osborne e Patterson (2011), a elaboração de um argumento está associada à atividade epistémica da procura de evidências para justificar algo (e.g., Que evidências eu tenho para afirmar que ocorreu uma reação química?), enquanto que a explicação diz respeito à compreensão de como e porquê algo acontece, através da construção de um mecanismo causal plausível (e.g., O que acontece, ao nível corpuscular, quando estas substâncias entram em contacto para que uma reação química tenha ocorrido?). Outros autores (e.g., Lederman, Lederman,

& Antink, 2013) fazem ainda referência a esta diferença em termos da diferença entre uma lei e uma teoria: leis são afirmações ou descrições das relações entre fenómenos observáveis, enquanto teorias são explicações que inferem sobre como fenómenos observáveis ocorrem. Por exemplo, o comportamento de um gás pode ser descrito pela lei dos gases perfeitos, mas esta lei não é explicativa desse comportamento.

Não é o intuito deste trabalho discutir a pertinência de uma prática (elaborar um argumento) face à outra (construir uma explicação). A complexidade da relação entre ambas levanta questões pois, em muitos momentos, as duas sobrepõem-se e ambas são essenciais na compreensão e explicação do mundo natural (Brigandt, 2016; Osborne & Patterson, 2011). Contudo, sendo o objetivo primário desta tese compreender como os alunos constroem explicações e que estratégias ou ferramentas os podem apoiar a progredir nesta prática, é fundamental manter uma distinção clara entre ambas. Com efeito, uma integração equilibrada entre ambas—raciocinar com base em evidências e raciocinar com base nos mecanismos subjacentes—tende a não acontecer nas salas de aula de ciências, em prejuízo da última (Braaten & Windschitl, 2011; Russ et al., 2008). De facto, são escassas as oportunidades para os alunos se envolverem na construção de explicações (Rönnebeck et al., 2016). E quando essas oportunidades são criadas, frequentemente a descrição de observações e o enunciado de leis para dar sentido a essas observações torna-se a prática dominante (Braaten & Windschitl, 2011). Esta tese circunscreve-se à prática de construir explicações científicas e, portanto, não considera a prática de elaborar argumentos.

## **2.2 | Explicações científicas: raciocínio mecanicista**

Das muitas formas que uma explicação científica pode tomar, as explicações mecanicistas têm recentemente vindo a receber considerável atenção na educação em ciência (Braaten & Windschitl, 2011; Cooper, 2015; NRC, 2012; NGSS, 2013; Perkins & Grotzer, 2005; Russ et al., 2008; Southard et al., 2017; Talanquer, 2018b). Construir explicações científicas com base no relato dos mecanismos explicativos subjacentes aos fenómenos, ou posto de outra forma, raciocinar de forma mecanicista é o cunho do pensamento científico atual (Craver & Darden, 2013). Dada a centralidade desta forma de cognição para a ciência e outras profissões CTEM (ciência-tecnologia-engenharia-matemática), o raciocínio mecanicista

tornou-se também um lugar de interesse no discurso da educação em ciência (NGSS, 2013; NRC, 2012).

Na última década tem se assistido a um reconhecimento da importância e potencial de levar os alunos a construir explicações científicas que requerem raciocinar de forma mecanicista (Kapon, 2017; Russ et al., 2008; van Mil et al., 2016). Atuais documentos curriculares da educação em ciência (NGSS, 2013; NRC, 2012) perspetivam a construção de explicações como uma das oito práticas científicas fundamentais e sublinham a integração do raciocínio mecanicista como um conceito transversal essencial a esta prática (Quinn, 2016).

De uma forma simples poder-se-á dizer que um mecanismo descreve como algo funciona, sendo que aprender como algo funciona envolve aprender as formas de o explicar, prever e controlar (McCain, 2015). Em diversas áreas da ciência o que é tomado por uma explicação satisfatória (com força explicativa) requer um relato dos mecanismos subjacentes ao fenómeno em explicação (Machamer, Darden, & Craver, 2000). Desta forma, parte da prática científica em diversos domínios constitui-se assim na busca dos mecanismos que explicam como um fenómeno ocorre ou como um determinado processo funciona (Craver & Darden, 2013).

Entre as abordagens contemporâneas da filosofia da ciência na descrição do que é um mecanismo destaca-se o trabalho de Machamer e colegas (2000). Segundo estes autores, um mecanismo é composto por um conjunto de entidades com determinadas propriedades, e pelas as atividades em que essas entidades estão implicadas, e a forma como se organizam para produzir mudanças regulares de um estado inicial a um estado final (Machamer et al., 2000). Uma explicação mecanicista explica assim como e porquê um fenómeno acontece através da descrição detalhada dos mecanismos subjacentes às relações causa-efeito. Um relato mecanicista considera como as atividades das entidades constituintes de um determinado sistema se afetam entre si, os efeitos que produzem umas nas outras e como a sua organização espacial e temporal produz determinadas mudanças.

Ao raciocinar acerca dos possíveis mecanismos que explicam os fenómenos, os alunos não estão simplesmente a aprender factos (e.g., a temperatura leva uma substância a alterar o seu estado físico); mas a tentar compreender as causas subjacentes a esses factos (e.g., Como se comportam as entidades que compõem a substância quando a temperatura aumenta?) (Braaten & Windschitl, 2011; McCain, 2015; Talanquer, 2018a). Este

é um aspeto crítico para uma educação em ciência que perspetiva o desenvolvimento de uma literacia científica funcional. Quando constroem explicações, raciocinando de forma mecanicista acerca dos fenómenos, os alunos envolvem-se num processo de construção de conhecimento científico na prática. O foco é na investigação de uma questão que requer uma explicação. Com efeito, ao fazê-lo os alunos raciocinam através de possíveis mecanismos e testam-nos para apreciar o seu mérito na explicação de um fenómeno em estudo. Eventualmente, neste processo, os alunos são levados a reconhecer que um determinado mecanismo poderá deixar sem resposta algumas questões (Barth-Cohen, 2018). Questões essas que então requerem a procura e construção de novas tentativas de explicação. Neste processo iterativo espera-se que os alunos desenvolvam uma melhor compreensão das ideias da ciência, da sua natureza, do mundo natural à sua volta, bem como a capacidade de propor soluções para alguns dos seus problemas (NRC, 2012). Reconhece-se que estes processos iterativos são importantes para o desenvolvimento metacognitivo dos alunos, pois ajudam a reconhecer, avaliar e decidir quando reconstruir as suas ideias e raciocínios intuitivos. Das ciências da cognição sabe-se ainda que o conhecimento não é algo que se instala, mas que se desenvolve ao longo do tempo; num processo de organização e vinculação das ideias centrais a determinado assunto, formando uma base sólida para as aprendizagens posteriores (diSessa, 1993).

Desde cedo as crianças incluem nos seus recursos de aprendizagem uma propensão para raciocinar através de causas e efeitos (Brewer et al., 1998; Bolger et al., 2012), atribuindo um papel de causalidade ao mundo à sua volta (Brewer et al., 1998). No entanto, esta capacidade e predisposição para atribuir relações de causalidade são difíceis de expandir durante os subsequentes anos de escolaridade. De facto, frequentemente os alunos têm dificuldade em conciliar as suas ideias intuitivas sobre relações de causalidade quando tentam explicar fenómenos que envolvem mecanismos mais complexos e contra-intuitivos, como nos movimentos de corpos na física, no funcionamento de sistemas aquáticos na biologia, ou nas transformações da matéria na química, i.e., mecanismos que envolvem entidades não observáveis à escala humana, e (ou) processos abstratos que podem ser não lineares, dinâmicos, discretos ou interativos (Grotzer & Tutwiler, 2014). Nestas situações os alunos revelam uma tendência para assumir relações simples de causalidade linear, onde a relação causa-efeito é direta. Mais especificamente, é frequente os alunos não assumirem a possibilidade de causas condicionais que atuam não-linearmente; estabelecem causas baseadas em eventos, em vez de processos; consideram



agentes ativos ou intencionais, em vez de causas não intencionais ou passivas; e centralizam as relações num mínimo de fatores, omitindo interações entre causas subjacentes e efeitos emergentes (Cuzzolino et al., 2019; Perkins & Grotzer, 2005).

Esta descontinuidade—entre uma aparente competência inicial e uma posterior dificuldade—sugere que é improvável que a capacidade de estabelecer relações de causalidade para eventos do quotidiano, por si só, leve a um raciocínio mecanicista complexo e produtivo (Grotzer & Tutwiler 2014). As atuais explicações sobre como se desenvolve esta forma de raciocínio estão longe de serem completas (Bolger et al., 2012). Estes, e outros autores, (e.g., Grotzer & Tutwiler 2014; Russ et al., 2008; Talanquer, 2018b; Southard et al., 2017) reconhecem a necessidade de melhor se conhecer sobre como é gerado o raciocínio mecanicista dos alunos e sobre as estratégias e ferramentas que podem apoiar e ampliar esta forma de raciocínio ao longo do ensino básico e secundário. Alguns estudos empíricos (e.g., Bolger et al., 2012; Parnafes, 2012; Russ et al., 2008; Southard et al., 2017) têm vindo a mostrar que quando lhes são dadas oportunidades, através de estratégias didáticas bem pensadas, os alunos podem ser levados a envolverem-se em raciocínios mecanicistas sofisticados. Mais especificamente, quando os alunos são levados a pensar e a tornar o seu pensamento visível e quando as suas ideias podem ser analisadas e desafiadas (Parnafes, 2012). De facto, muitos alunos, mais frequentemente do que se supõe, expressam formas de raciocínio produtivas que podem ser utilizadas para elaborar mecanismos mais complexos (Wiser & Smith, 2016).

## **2.3 | Raciocínio mecanicista na química**

O raciocínio mecanicista é particularmente importante em química, pois, apesar do facto das transformações nas propriedades da matéria poderem ser observáveis ao nível macroscópico, uma explicação de tais observações só pode ser alcançada através dos mecanismos ao nível submicroscópico (ou seja, o nível de átomos, das moléculas, etc.) (Cooper, 2015; Talanquer, 2018b). Além disso, esses mecanismos não podem ser deduzidos diretamente das propriedades individuais das entidades submicroscópicas, pois emergem das interações coletivas destas entidades que resultam de seu movimento intrínseco e aleatório (Tümay, 2016).

Em química, explicar como e porquê um fenómeno ocorre, por exemplo, uma reação química ou mudança de fase, implica considerar as entidades constituintes das

substâncias envolvidas (e.g., átomos ou moléculas). Por sua vez, tem de considerar-se que estas entidades têm certas propriedades que determinam o seu comportamento (sendo que estas propriedades podem ser implícitas em vez de explícitas, e.g., polaridade). Depois há ainda que considerar que essas propriedades afetam como uma entidade interage com outra, idêntica ou não. E, por sua vez, estas interações irão determinar como um sistema com muitas entidades responde a uma alteração no seu ambiente. Por exemplo, como a distribuição espacial destas entidades se altera quando há trocas de energia com o exterior (Talanquer, 2018b). Adicionalmente requer ainda considerar que as propriedades macroscópicas de uma substância ou material emergem destes processos ao nível submicroscópico. Isto implica reconhecer que as propriedades macroscópicas de um material são diferentes das propriedades das entidades submicroscópicas que o constituem. Por exemplo, que um átomo de cobre não é maleável (Ben-Zvy, Elyon, & Silberstein, 1986) ou que os átomos não têm as cores das substância que constituem. Por outras palavras, raciocinar de forma mecanicista acerca dos fenómenos da química implica pensar através de diferentes níveis escalares (e.g., macroscópico e submicroscópico), considerar as entidades e analisar as interações e os processos a ocorrer ao nível submicroscópico e usá-los para dar sentido às propriedades observadas ao nível macroscópico. Todo este processo é exigente e, com efeito, frequentemente as explicações dos alunos tendem a não se aproximar deste grau de complexidade (Cooper, 2015; Talanquer, 2018b). De facto, muitas vezes, o que se observa é que as explicações dos alunos tendem a cair em dois tipos de relato: a descrever apenas os fenómenos ao nível macroscópico, sem discutir como e porquê estes são produzidos (Papageorgiou, 2013; Talanquer, 2007), ou a interpretar intuitivamente os mecanismos do nível submicroscópico diretamente do comportamento do fenómeno observado (Samon & Lezy, 2017; Talanquer, 2018b). E, desta forma, falhando no estabelecimento de uma conexão coerente entre o fenómeno e os seus mecanismos subjacentes (Becker, Noyes, & Cooper, 2016; Moreira, Marzabal, & Talanquer, 2018).

## **2.4 | Representações visuais na educação em ciência**

Historicamente, a investigação em educação tende a dar ênfase à aprendizagem verbal mais do que às aprendizagens visuais; tendência que continua a persistir em muitas salas de aula (Fan, 2015; Parnafes, 2014). O uso de representações visuais (e.g., imagens, vídeos,

esquemas, desenhos, diagramas, tabelas, gráficos, modelos) é comum na prática científica. São utilizadas, por exemplo, para interagir com fenómenos complexos, apresentar múltiplas relações e processos ou para promover uma compreensão compartilhada de um fenómeno em estudo (Kozma, 2003). As representações visuais oferecem um meio para tornar visível entidades e processos que são demasiado pequenos, grandes, rápidos ou lentos, para que sejam observados diretamente. Com a proliferação de múltiplos meios visuais para a transmissão de informação, a capacidade de compreender, avaliar e produzir representações visuais tornou-se mais importante na educação (Cook, 2006). As representações visuais têm o potencial de atrair e manter a atenção e motivação. Ao proporcionarem um modo adicional de representar informação, as representações visuais podem melhorar a retenção de informação, apoiar a resolução de problemas e facilitar a integração de novos conhecimentos com os conhecimentos prévios (Cook, 2006; Roth, Bowen, & McGinn, 1999).

Atualmente, e cada vez mais na educação em ciência é comum o uso de representações visuais, como diagramas, videos e simulações; e estas são cada vez mais sofisticadas. Acredita-se no seu potencial para o desenvolvimento de uma compreensão mais profunda dos conceitos associados. No entanto, nem sempre o uso de certas representações visuais atende a este objetivo (Akaygun & Jones, 2013; Kelly & Jones, 2008; Zhang & Linn, 2011). De facto, é frequente os alunos mostrarem maior dificuldade em compreender uma determinada representação visual do que é à partida assumido. Por exemplo, determinadas representações visuais, como um gráfico, que possam ter sido desenhadas para serem úteis cognitivamente, podem vir a revelar-se funcionalmente inúteis se o aluno não percebe a informação aí representada como teria sido pretendido (Sfard & Kieran, 2001; Wu, Krajcik, & Soloway, 2001).

No caso da química, que lida com o mundo não observável (a não ser através de meios sofisticados), os alunos devem aprender modos diferentes de o representar, incluindo diferentes tipos de representações estruturais e diferentes abordagens para visualizar os mecanismos ao nível submicroscópico. Estando as entidades responsáveis pelo comportamento macroscópico das substâncias numa escala demasiado pequena para ser observada, uma preocupação no ensino da química tem sido criar formas de tornar este nível mais acessível aos alunos (Cooper & Stowe; 2018).

Nas duas últimas décadas, vários dos estudos empíricos sobre o uso de representações visuais em química focaram-se nas representações visuais dinâmicas (animações e simulações em computador) (Cooper & Stowe; 2018). Alguns estudos têm reportado (e.g., Ardac & Akaygun, 2004, 2005; Wu et al., 2001) que o uso destas representações visuais, ao possibilitarem a visualização e animação de aspectos estruturais e dinâmicos das entidades ao nível submicroscópico, ajudam a desenvolver modelos mentais acerca da natureza corpuscular da matéria mais completos e próximos dos modelos canónicos da química. Por sua vez, o desenvolvimento destes modelos parece estar associado a um aumento da compreensão conceptual (Akaygun, 2016; Ardac & Akaygun, 2004; Williamson & Abraham, 1995). Contudo, nem todas as representações se mostram eficazes para melhorar a aprendizagem da química. De facto, alguns estudos (Kelly & Jones, 2008; Rosenthal & Sanger, 2012; Underwood, Reyes-Gastelum, & Cooper, 2016) revelaram que, mesmo depois do uso de animações ou simulações bem desenhadas, alguns alunos mantêm modelos mentais não canónicos. Um aspeto que tem sido sugerido como explicação para estes resultados é a dificuldade dos alunos em compreenderem e utilizarem produtivamente estas representações visuais.

## **2.5 | Representações visuais criadas pelos alunos: o desenho**

Uma parte da investigação relacionada com as representações visuais na educação em ciência, e particularmente na química, tem-se focado em explorar a interpretação e uso dessas representações como ferramenta de apoio à compreensão cognitiva, i.e., no uso das representações visuais como produtos da ciência para facilitar a compreensão dos alunos sobre um determinado tópico (Evagorou et al., 2015). Contudo, é cada vez maior o reconhecimento que as representações visuais que os alunos criam—nomeadamente a criação de desenhos—, mais do que ferramentas para a compreensão conceptual, são um processo de desenvolvimento dessa compreensão (Ainsworth et al., 2011; Cooper et al., 2017; Tytler et al., 2013).

A criação de representações visuais é inerente ao pensamento científico (Evagorou et al., 2015; Kozma et al., 2009). Os cientistas não usam apenas palavras, mas dependem da criação de uma variedade de representações visuais, entres as quais os desenhos, esboços e diagramas, para fazer descobertas, imaginar novas relações, testar ideias,

elaborar o seu conhecimento, explicar e comunicar resultados (Gilbert, 2005; Latour, 1999; Nersessian, 2008). No caso dos químicos, porque lidam com mecanismos de fenómenos não observáveis e imperceptíveis, a maior parte das vezes é difícil, ou mesmo impossível, pensar e comunicar as suas ideias sem criar representações que as possam exteriorizar visualmente. Contudo, na sala de aula de química, a abordagem mais comum é a interpretação de representações visuais fornecidas pelo professor ou pelos manuais, sendo raro que os alunos sejam levados a criar de forma sistemática as suas próprias representações visuais como processo de desenvolvimento ou comunicação das suas ideias (Ainsworth et al., 2011).

A importância do desenho na prática científica (Latour, 1999; Lynch & Woolgar, 1990) e um crescente reconhecimento do seu potencial na educação em ciência (Ainsworth et al., 2011; Chi & Wylie, 2014; Forbus & Ainsworth, 2017), tem vindo a inspirar um número de trabalhos (e.g., Ainsworth et al., 2011) focados no desenho e a reconhecer as suas potencialidades para a aprendizagem das ciências. De modo geral, o desenho tem inúmeras vantagens. São rápidos e fáceis de produzir, sendo necessário apenas um certo grau de detalhe para as finalidades pretendidas (Kirsh, 2011; Tversky & Suwa, 2009). Para além disso, são um meio pouco dispendioso e podem ser produzidos quando e onde necessário (Wardak, 2017). A criação de um desenho em papel e lápis é uma forma de expressão relativamente livre que pode ajudar na exploração de ideias inicialmente vagas (Tversky, 2011; Tversky & Suwa, 2009).

Criar representações visuais através do desenho requer que os alunos mobilizem o seu conhecimento sobre o que está a ser representado (Chi, 2009; Waldrup & Prain, 2012). Os desenhos criados pelos alunos podem traduzir os seus modelos mentais em representações externas e, portanto, visíveis (Akaygun, 2016; Zhang & Linn, 2011). Tal tradução tem sido considerada fundamental para desencadear novas ideias ou para elaborar ideias prévias (Chi, 2009). Por outro lado, à medida que os alunos interagem com os seus desenhos e melhoram a sua compreensão, os seus desenhos eventualmente também melhoram, resultando em desenhos mais completos e mais próximos dos modelos canónicos da disciplina (Chang et al., 2014; Prain, Tytler, & Peterson, 2009; Schwarz et al., 2009; Williams, Underwood, & Klymkowsky, 2015).

Os desenhos que os alunos criam podem ainda revelar detalhes significativos sobre a qualidade e complexidade da sua compreensão. Por exemplo, podem revelar

concepções que passariam despercebidas com o uso de instrumentos de avaliação mais tradicionais que não envolvem, por exemplo, o desenho (Cooper, Williams, & Underwood, 2015). Cooper e Stowe (2018), numa extensa revisão de literatura na investigação educacional em química, salientam que fortes evidências de uma compreensão coerente e mobilizável só podem ser obtidas através de tarefas que levem os alunos a mobilizar o seu conhecimento. Os autores sugerem que tarefas que levem à criação de desenhos ao nível submicroscópico podem servir para mobilizar os conhecimentos dos alunos e tornar o seu pensamento visível. Desta forma, os desenhos dos alunos podem constituir importantes evidências de uma compreensão mais profunda. O desenho pode ainda oferecer benefícios associados ao envolvimento e treino de competências observacionais, resolução de problemas, e da capacidade comunicativa e de argumentação (Ainsworth et al., 2011; Chang, Quintana, & Krajcik, 2009; Quillin & Thomas, 2015; Van Meter & Garner, 2005). Apesar destes estudos justificarem as recentes reivindicações de incorporar a criação de desenhos na sala de aula de ciências, escassos são ainda os estudos empíricos que validam as suas potencialidades para aprender ciência (Ainsworth et al., 2011; Forbus & Ainsworth, 2017; Waldrip & Prain, 2012). Além disso, alguns estudos têm reportado resultados díspares quanto aos ganhos significativos na aprendizagem (e.g., Cooper et al. 2017; Zhang & Linn, 2011). Os estudos empíricos neste campo têm-se dispersado por diferentes tópicos, diferentes ambientes de aprendizagem e focado diferentes aspetos do desenho. Esta diversidade tem tornado difícil a avaliação dos reais benefícios do desenho na aprendizagem (Cooper & Stowe, 2018). Alguns destes estudos focam-se na compreensão de como os alunos desenharam representações visuais ao nível corpuscular (Akaygun & Jones, 2013); nas representações ou modelos que os alunos criam quando envolvidos em investigações (Schwartz et al.; 2009; Prain et al., 2009), ou na combinação do desenho com representações visuais dinâmicas de estruturas moleculares para melhor compreender o seu comportamento e interações (Kelly & Jones, 2008; Stieff, 2011; Stieff & deSutter, 2016; Zhang & Linn, 2011). O que, no entanto, reúne algum consenso nesta diversidade de estudos, é que, tal como outras abordagens de ensino, a forma como o desenho é integrado nas atividades de aprendizagem afeta os possíveis resultados obtidos (Cooper et al., 2017; Cooper & Stowe, 2018). Um outro aspeto, que mais recentemente tem vindo a ser apontado (e.g., Park, Tang, & Won, 2020), é que parece não ser o simples ato de desenhar uma

representação visual que em si traz benefícios para os alunos, mas sim o processo no qual os alunos se envolvem quando criam essas representações.

## **2.6 | Criação de desenhos: cognição distribuída e incorporada**

Na educação em ciência a maior tendência tem sido para conceptualizar e posicionar o desenho como uma ferramenta que serve a um determinado processo, por exemplo, para aceder e clarificar os modelos mentais dos alunos ou para comunicar um produto acabado. Mais especificamente, o desenho como uma ferramenta para apoiar aquilo que são essencialmente processos cognitivos internos; em vez de, o desenho como uma representação externa que, por si, tem um papel nesses processos que não é necessariamente mediada por uma representação interna (Zhang, 1997). Existe no entanto um corpo de investigação, nomeadamente em áreas como o design e a arquitetura (Bilda, Gero, & Purcell, 2006; Healey, 2006; Tholander et al., 2008; Tversky, 2011; Wardak, 2017) que têm focado o desenho como processo de criação em oposição ao desenho como o produtor final de um processo. Estes estudos têm vindo a apresentar evidências de que o processo de criação de um desenho é desordenado, exploratório e que o desenho é, sobretudo, um atividade situacional. Por outras palavras, o desenho encontra o seu significado no contexto da sua criação e uso (Tholander et al., 2008). Desta forma, quando vários intervenientes estão envolvidos no processo de criação de um desenho, é a coordenação de ações, conceções, preocupações e perceções entre as partes envolvidas que vai criando e moldando este processo e consequentemente o produto que daí resulta (Tholander et al., 2008; Wardak, 2017). Nesta perspetiva, considerar um desenho como o produto de uma interação é uma perspectiva incompleta; em vez disso, o desenho constitui-se na interação através do envolvimento ativo dos intervenientes por meio de ações verbais e físicas incorporadas no ambiente envolvente.

Na educação em ciência, à data da presente tese, apenas um conjunto escasso de estudos sobre o desenho como forma de aprendizagem, conceptualizaram o desenho como uma atividade situacional (e.g., Parnafes, 2012; Tytler et al., 2020). Contudo, esta perspetiva é essencial para expandir a compreensão dos mecanismos pelos quais o desenho pode promover a aprendizagem, pois permite captar a natureza das interações sociais e cognitivas a ocorrer em torno da sua criação. Mais especificamente, requer captar

estas interações como parte integrante da criação do desenho, ou seja, requer abordar o processo de criação de desenhos como um processo de cognição distribuída e incorporada (Osbeck & Nersessian, 2006; Wardak, 2017). As teorias da cognição distribuída postulam que “os processos culturais e cognitivos não são meramente inter-relacionados, mas também co-implicados” (Osbeck & Nersessian, 2014, p. 83), ou seja, são processos compartilhados (Hutchins, 2014). A cognição distribuída assume que qualquer exemplo de cognição emerge de processos distribuídos, não necessariamente centralizados na mente ou nos seus processos representacionais (Osbeck & Nersessian, 2014). Assim, os processos cognitivos não podem ser tratados separadamente do ambiente em que ocorrem, mas como emergentes das interações entre os indivíduos e o ambiente, incluindo as suas características socioculturais (Hutchins, 1995; Osbeck & Nersessian, 2006). Esta perspectiva implica, por exemplo, que um indivíduo forma com o seu desenho um sistema cognitivo que será diferente daquele que se formaria numa outra atividade. Mais, um grupo de indivíduos criando um desenho formam um sistema social e cognitivo (indivíduo-indivíduo; desenho-indivíduo), necessariamente diferente de qualquer outro grupo envolvido numa outra atividade. Ou seja, quaisquer processos cognitivos nos sistemas formados emergem da interação complexa entre os intervenientes e as propriedades do ambiente (Nersessian, 2006).

Adicionalmente, a investigação em ciência cognitiva, neurociência, psicologia e linguística tem vindo a mostrar que o sistema sensorial-motor tem um papel importante na cognição (e.g., Clark, 1998; Johnson, 2009; Lakoff & Johnson, 1980; Tversky, 2011; Wilson, 2002). De acordo com esta perspetiva, o cérebro não é um processador central e abstrato de informação, onde os sistemas percetivo e motor são módulos de entrada e saída para esse processador central. Pelo contrário, os processos cognitivos não podem ser divorciados do ambiente onde ocorrem, dos estados do corpo e das interações entre o corpo e o ambiente (Abrahamson & Lindgren, 2014; Barsalou, 2008). Mais especificamente, perceção e ações influenciam o ambiente onde esses processos acontecem, e logo os próprios processos e os produtos desses processos.

A perspetiva da cognição distribuída e incorporada é particularmente importante quando o foco está num sistema que envolve interações sociais e físicas, ou seja, entre indivíduos e o ambiente material em seu redor, neste caso os alunos a criar um desenho. Segundo esta perspetiva, o desenho é central aos processos cognitivos, sendo mais do que



uma ferramenta física de apoio para esses processos (Zhang, 1997). Os processos cognitivos têm lugar não apenas na mente do indivíduo, mas distribuem-se através dos artefactos, dos indivíduos, e das suas ações comunicativas (e.g., fala) e formas de expressão incorporadas (e.g., gestos e outros movimentos do corpo) (Barsalou, 2008; Zhang, 1997). Assim, o desenho e o contexto da sua criação devem ser analisados como parte integrante dos processos cognitivos (Hutchins, 2006; Nersessian, 2006; Osbeck & Nersessian, 2014). Nesse sentido, os desenhos elaborados pelos alunos para apoiar a construção de explicações devem ser analisados como parte integrante dos seus processos de raciocínio. Até à data são poucos os estudos que assumiram o desenho como parte integrante nos processos de raciocínio dos alunos (e.g., Tytler et al., 2020), deixando uma lacuna para uma compreensão mais abrangente do que pode ser o papel do desenho nestes processos.

## 3 | Fundamentação metodológica

---

### 3.1 | Metodologia mista

No âmbito da presente tese considerou-se uma abordagem metodológica mista. De uma forma simples, uma metodologia mista pode ser definida como uma investigação onde paradigmas, métodos, técnicas, abordagens, conceitos e/ou linguagens, de natureza qualitativa e quantitativa se misturam ou combinam (Johnson & Onwuegbuzie, 2004). Será, portanto, mais apropriado falar em metodologia de investigação mista, em vez de simplesmente métodos mistos. Como Levin e Wagner (2015) argumentam, métodos são procedimentos concretos para alcançar um fim específico, enquanto metodologia é um constructo de nível superior que fornece um racional de escolha entre diferentes métodos. Por outras palavras, a metodologia mista compreende o enquadramento metodológico e os métodos ou técnicas utilizados.

Vários autores têm ponderado o valor relativo da investigação qualitativa e quantitativa (e.g., Patton, 2002; Phillips, 2005). O que distingue uma investigação de natureza qualitativa ou quantitativa não são simplesmente os seus aspectos metodológicos, mas também aspectos ontológicos, epistemológicos e da filosofia da ciência (Eberle, 2005). A investigação qualitativa encontra-se frequentemente associada aos paradigmas interpretativistas, como a fenomenologia, hermenêutica social e constructivismo. Neste sentido, manifesta a transição do foco no objetivo para a construção de múltiplas realidades, percepcionando-as como complexas, não-deterministas e contextualizadas no ambiente em que ocorrem (Bresler & Stake, 1992). Por seu lado, a investigação quantitativa tende a focar-se na determinação causal, dedução, confirmação, teste de hipóteses, previsões, análise estatísticas e generalização de resultados. A metodologia mista de investigação, conceptualmente livre da dicotomia quantitativo-qualitativo, traz uma compreensão da relevância e realidade da pluralidade, reconhecendo a diversidade entre os métodos de investigação com os seus pontos fortes e fracos. Considerar esta pluralidade oferece benefícios na investigação em educação em ciência, pois permite ampliar e aprofundar a capacidade para explorar e compreender fenómenos inerentemente complexos, como o desenvolvimento do conhecimento e processos de raciocínio dos

alunos acerca das ideias e das práticas da ciência (Levin & Wagner, 2015); fenômenos a que esta investigação se dedica.

No âmbito desta tese, a escolha de uma abordagem metodológica mista foi considerada, não por um compromisso predeterminado por um certo paradigma ou metodologia, mas pelo o compromisso de encontrar um conjunto de métodos que pudessem responder às nuances das suas questões de investigação. Assim, ao reconhecer e ponderar as características específicas, bem como pontos fortes e fracos, de ambos os paradigmas, qualitativo e quantitativo, tirou-se partido de ambos, utilizando-os de acordo com o que Johnson e Turner (2003) designaram pelo princípio fundamental da investigação mista. De acordo com este princípio, a multiplicidade de técnicas, métodos, abordagens e conceitos a utilizar, devem ser sempre considerados de forma a que a sua combinação conduza a uma complementaridade dos seus eventuais pontos fortes e não a uma sobreposição dos eventuais pontos fracos. A aplicação deste princípio é, por si, uma razão crítica para considerar uma metodologia mista, uma vez que se assume que o resultado daí obtido será necessariamente superior ao de considerar uma investigação mono-metodológica (Johnson & Onwuegbuzie, 2004).

O propósito desta tese centrou-se na expansão de um corpo de conhecimentos e na compreensão e explicação de um fenómeno—a criação e uso de desenhos para apoiar a construção de explicações científicas. Sendo este um fenómeno até à data pouco estudado, considerou-se importante combinar abordagens quantitativas e qualitativas de forma a obter um corpo de resultados mais abrangente. Neste sentido, com o objetivo de conhecer a natureza das explicações que os alunos constroem e examinar o seu progresso, antes e após a implementação de uma estratégia didática baseada em desenhos, adotou-se uma abordagem quantitativa utilizando a investigação por inquérito. Adicionalmente, para desenvolver uma compreensão profunda dos mecanismos subjacentes à criação e uso de desenhos que podem apoiar o raciocínio mecanicista e a construção de explicações científicas, adotou-se uma abordagem qualitativa utilizando uma micro-análise etnográfica.

## **3.2 | Desenho geral da investigação**

No desenho de uma investigação de metodologia mista existe uma infinidade de possibilidades quanto à organização dos métodos a utilizar. Johnson e Onwuegbuzie (2004) sugerem dois tipos principais de estrutura que podem, por sua vez, ser combinados de

diferentes formas no desenho da investigação, nomeadamente i) métodos-mistos que envolvem uma sequência de duas ou mais fases distintas no processo de investigação, por exemplo, uma fase quantitativa que é seguida temporalmente de uma fase qualitativa, e ii) modelos-mistos que misturam abordagens qualitativas e quantitativas numa mesma fase do processo de investigação. Nesta tese utilizou-se uma combinação de ambos.

O desenho geral desta investigação foi sequencial (métodos-mistos), onde uma componente predominantemente quantitativa (Estudo I e II) foi seguida por uma componente qualitativa (Estudo III). No entanto, na sua estrutura interna, o desenho dos Estudos I e II incluíram métodos qualitativos e quantitativos (modelo-mistos). O diagrama da Figura 2 é uma representação do desenho da presente investigação.

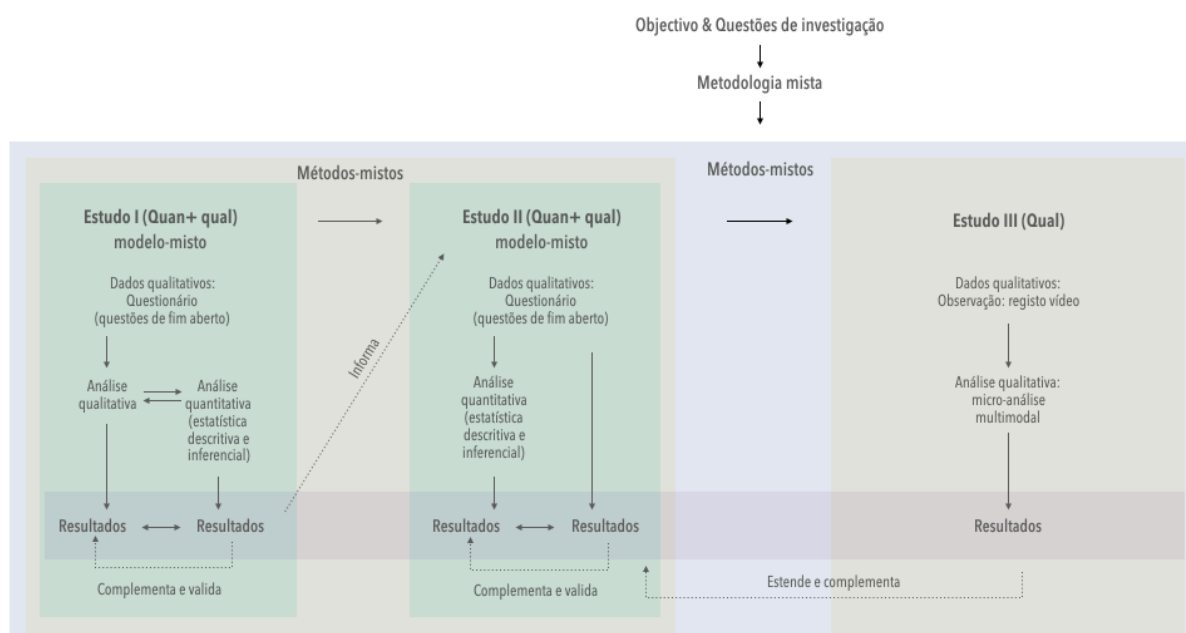


Figura 2. Diagrama do desenho da investigação.

Ao adoptar uma investigação de metodologia mista, o desenho da investigação deve ser pensado e estruturado de forma a atender a diferentes propósitos que justificam as opções metodológicas tomadas. Greene, Caracelli e Graham (1989) sugerem cinco propósitos ou racionais para o desenho de uma investigação de metodologia mista, momentaneamente o da *triangulação*—que procura a convergência e corroboração de resultados ao usar diferentes métodos para estudar um mesmo fenómeno; ii) *complementaridade* (ou *elaboração*)—que procura a elaboração, aprimoramento, ilustração, clarificação dos resultados de um método ou desenho através de outro; iii) *desenvolvimento*—que procura combinar ou usar os resultados de um método ou vários

métodos num estudo para informar, moldar ou desenvolver outro estudo, ou os seus métodos; iv) *iniciação* —que procura paradoxos ou contradições nos resultados para gerar novas questões de investigação; v) *expansão*—que procura expandir o alcance e a amplitude da investigação ao usar diferentes métodos para diferentes componentes da investigação. Na presente investigação, o desenho de uma metodologia mista foi pensado com os propósitos primários do *desenvolvimento*, *complementaridade* e *expansão*. Estes propósitos e a sua aplicação para cada um dos estudos que constituem esta tese, bem como a sua relação, são em seguida apresentados.

No Estudo I desenvolveu-se um sistema de análise com o objetivo de caracterizar a natureza das explicações dos alunos. Foram recolhidas as explicações escritas dos alunos através de um questionário de questões de resposta aberta (dados qualitativos). Procedeu-se à análise qualitativa das explicações escritas dos alunos com o objetivo de se desenvolver um sistema de análise. O sistema de análise desenvolvido permitiu criar categorias quantitativas para as explicações dos alunos, possibilitando a sua análise através de métodos estatísticos descritivos e indutivos (análise quantitativa). Desta forma, a adoção de um modelo-misto no Estudo I teve como propósito o *desenvolvimento* de um referencial de análise a partir da análise qualitativa das explicações dos alunos que, por sua vez, permitiu obter resultados quantitativos relativos à natureza das explicações dos alunos. Adicionalmente, os resultados da análise qualitativa iluminaram o significado dos resultados estatísticos, adicionando uma compreensão narrativa aos resultados da análise quantitativa (ver Figura 2). Desta forma, a adoção de um modelo-misto teve ainda o propósito da *complementaridade* onde os resultados de dois métodos proporcionaram uma perspetiva mais ampla sobre o objecto de estudo.

No Estudo II, o progresso das explicações dos alunos foi comparado através da aplicação de um questionário de natureza qualitativa, antes e após a implementação de uma estratégia didática (informada pelos resultados da análise do Estudo I) (ver Figura 2). Os dados qualitativos recolhidos através do questionário foram analisados com base em categorias quantitativas (desenvolvidas no Estudo I), possibilitando a sua análise através de métodos estatísticos descritivos e indutivos (análise quantitativa). Adicionalmente, os dados qualitativos recolhidos através do questionário foram usados na apresentação dos resultados da análise estatística para ilustrar, dar sentido, e ganhar uma ampla compreensão e clareza. Desta forma, a adoção de um modelo-misto no Estudo II teve o

propósito de *complementar* os resultados emergentes de dois métodos. Mais, na condução sequencial dos Estudo I e II (métodos-mistos), os resultados emergentes do Estudo I informaram o *desenvolvimento* do Estudo II.

No Estudo III, sequencial ao Estudo II (métodos-mistos), adoptou-se uma abordagem etnográfica com o uso de métodos de micro-análise multimodal (Jewitt, Bezemer, & O'Halloran, 2016; Norris, 2004) com o propósito de ampliar o alcance da investigação, *expandindo e complementando* o corpo de resultados do Estudo II (ver Figura 2). Enquanto o Estudo II se focou na análise estatística para comparar e correlacionar os produtos produzidos pelos alunos (explicações escritas e desenhos) como resultado de uma intervenção, o Estudo III permitiu à investigadora mover-se para o nível micro—o nível das interações sócio-cognitivas a acontecer no processo da criação e uso de desenhos no desenvolvimento de uma explicação—para explorar e explicar os possíveis mecanismos subjacentes à progressão observada. Sendo escassos os estudos empíricos que até a data ofereceram um contributo para explicar os mecanismos pelos quais o desenho pode apoiar a construção das explicações científicas dos alunos, usar uma abordagem de metodologias mistas não foi apenas justificado, mas necessário. Adicionalmente, o Estudo III permitiu a triangulação (validação) de dados, uma vez que os resultados obtidos no Estudo III permitem corroborar os resultados do Estudo II.

Na secção seguinte apresenta-se um panorama geral de cada um dos três estudos que constituem esta tese, nomeadamente os seus propósitos ou racionais, os métodos de investigação utilizados para a sua concretização e os principais resultados obtidos.

### **3.3 | Procedimentos éticos**

Neste trabalho de investigação foram seguidos os princípios e as orientações da Carta Ética para a Investigação em Educação e Formação do Instituto de Educação da Universidade de Lisboa (2016) e do código de ética da AERA (2011).

Nos Estudos I e II, que envolveu a recolha de dados em ambiente escolar, foi aplicado, nas turmas participantes, um questionário. O instrumento de recolha de dados foi aplicado em sala de aula, nas aulas de ciências físico-químicas pelas professoras titulares das turmas participantes, sendo a sua aplicação observada pela investigadora. O instrumento de recolha de dados utilizado foi previamente submetidos à Direção Geral de Educação (pedido n.º 0461700004, registado em 11-11-2014 e aprovado a 20-11-2014).

Antes de se proceder à recolha de dados foi pedida autorização por escrito às direções dos agrupamentos das escolas envolvidas para a realização do estudo, informando acerca dos seus objetivos, momentos e condições da recolha de dados. Sendo todos os participantes menores (menos de 18 anos) foi previamente pedido o consentimento informado dos seus representantes legalmente autorizados. Todos os alunos participaram no estudo de forma voluntária. As autorizações assinadas pelos representantes legalmente autorizados ficaram em poder do agrupamento de escolas ao qual os alunos participantes pertenciam e onde se realizou o estudo. Em sala de aula, e antes da recolha de dados todos os alunos participantes foram informados oralmente pela autora do estudo acerca dos objetivos da investigação e dos momentos e condições da recolha de informação. Em todos os questionários recolhidos o nome do respetivo participante foi eliminado e substituído por um código, com o seguinte formato S (para aluno), seguido de uma letra maiúscula (A-E) para a turma do participante e um número de dois dígitos que designa o participante. Após esta operação cada questionário foi digitalizado para um documento em formato PDF protegido por uma palavra chave, apenas na posse da autora do estudo. Os questionários em papel foram posteriormente destruídos e eliminados.

No Estudo III, realizado fora da escola, sendo todos os participantes menores (menos de 18 anos) foi previamente pedido o consentimento informado dos seus representantes legalmente autorizados. O consentimento informado dos representantes legalmente autorizados dos participantes foi dado oralmente. O contacto da investigadora responsável pelo estudo foi disponibilizado para que em qualquer momento os participantes ou os seus representantes legais pudessem pedir esclarecimentos ou desistir da participação no estudo. Todos os alunos participaram no estudo de forma voluntária. Antes da recolha de dados todos os alunos participantes foram informados oralmente pela autora do estudo acerca dos objetivos da investigação e dos momentos e condições da recolha de informação. As gravações vídeo foram realizadas de forma a não captar a imagem da cara dos participantes. Posteriormente, dos registos vídeo, foram eliminadas quaisquer referências aos nomes dos participantes. Na transcrição dos registos vídeos foram utilizados pseudónimos. Os ficheiros de vídeo e de texto, respectivamente do registo vídeo e da sua transcrição foram guardados num disco rígido próprio, protegido com uma palavra chave, apenas na posse da autora do estudo. Os dados pessoais dos participantes não são divulgados nesta tese, nem nos respectivos artigos científicos publicados, ou qualquer outra publicação resultante desta tese. Sempre que for necessário utilizar trechos

de uma transcrição ou qualquer outro registo escrito dos participantes para ilustração dos resultados, serão identificados por pseudónimos (no caso do Estudo III) ou código do participante (no caso do Estudo I e II).



## 4 | Apresentação dos Estudos

---

Nesta secção apresentam-se os Estudos I-III. O objetivo é apresentar o racional de cada um dos estudos, os métodos específicos para a sua concretização e os seus principais resultados.

### 4.1 | Estudo I — Explicações científicas dos alunos: um sistema de análise

#### 4.1.1 | Racional do Estudo I

Com a prática de construir explicações científicas a ocupar um lugar de relevo na educação em ciência, uma das questões que se coloca é como analisar e caracterizar as explicações que os alunos constroem. Até à data deste estudo, escassos referenciais haviam sido propostos com esta finalidade, e especificamente para explicações que visam explicar os fenómenos naturais com base nos seus mecanismos subjacentes. Contudo, dois importantes referenciais são de destacar, o de Russ e colegas (2008) com o propósito de identificar os elementos estruturais de um relato mecanicista, e o de Perkins e Grotzer (2005) para identificar as dimensões de complexidade de um mecanismo. Apesar dos seus importantes contributos, uma dimensão essencial ausente nestes referenciais é a ideia de níveis emergentes, i.e., que o comportamento de um fenómeno emerge do colectivo das entidades e suas interações a um nível inferior ao do fenómeno (Wilensky & Resnick, 1999). Na explicação de um fenómeno através dos seus mecanismos subjacentes, a noção de pensar através de diferentes níveis é fundamental (Craver & Tabery, 2015; Darden, 2002; Levy & Wilensky, 2009; Wilensky & Resnick, 1999). Por exemplo, na química, grande parte dos seus fenómenos de interesse ocorrem ao nível material das substâncias e misturas de substâncias, no entanto, explicar as transformações que ocorrem a este nível envolve pensar ao nível submicroscópico dos átomos e das moléculas (Cooper, 2015; Johnstone, 1993; Levy & Wilensky, 2009; Taber, 2013; Talanquer, 2011, 2018a). Assim, na ausência de um referencial que permitisse captar de forma sistemática e prática elementos essenciais nas explicações científicas dos alunos, o primeiro dos três estudos desta tese teve como objetivo: i) desenvolver um sistema de análise para as explicações científicas dos alunos e ii) usar o sistema desenvolvido para caracterizar a natureza das explicações que alunos do 8.º ano constroem para fenómenos relacionados com a natureza corpuscular da matéria.

O sistema de análise foi desenvolvido com base na revisão, sistematização e integração de modelos teóricos das explicações científicas da filosofia da ciência e da literatura em educação em ciência, bem como de exemplos de explicações construídas por alunos. Nesta subsecção descreve-se o processo de desenvolvimento, refinamento e construção deste sistema de análise. Este processo envolveu, numa primeira fase, delinear uma definição operacional de explicação científica e, a partir desta, identificar as dimensões de uma "boa" explicação científica. Numa segunda fase recolheu-se através de um questionário as explicações de 189 alunos do 8.º ano, com base nas quais foi refinado e construído o sistema de análise. Por último, uma versão final do sistema foi utilizada para analisar e caracterizar as explicações científicas dos alunos.

#### **4.1.2 | Desenvolvimento do referencial de análise**

##### *Delinear uma definição operacional de explicação científica*

Revendo a literatura acerca das explicações científicas na educação em ciência, identificou-se a falta de uma definição explícita e bem articulada para este constructo. No contexto deste estudo, e sintetizando e integrando dois importantes modelos da filosofia da ciência —o modelo mecanicista (Salmon, 1984; Strevens, 2008; Woodward 2003) e o modelo unificacionista (Friedman, 1974; Kitcher, 1989)—definiu-se explicação científica como a construção de um relato lógico e coerente que dá sentido a um determinado fenómeno, utilizando as ideias chave da ciência para contar a história causal de como e porquê o fenómeno emerge dos seus mecanismos subjacentes.

Consistente com o modelo mecanicista (Salmon, 1984; Strevens, 2008; Woodward, 2003), explicar como e porquê um fenómeno ocorre requer identificar os seus fatores subjacentes e traçar a história de como estes se articulam num mecanismo capaz de produzir o fenómeno em explicação (Craver & Tabery, 2015; Strevens, 2008). Por exemplo, explicar como e porquê um balão expande quando exposto ao sol envolve identificar que o gás no balão é constituído por determinadas entidades com determinadas propriedades, e descrever as atividades em que estas entidades se envolvem para dar origem ao fenómeno em questão (Thagard, 2007).

Consistente com o modelo unificacionista, a força de uma explicação reside no seu potencial para unificar fenómenos aparentemente desconexos através de um enquadramento teórico-conceitual compreensivo e coerente (Friedman, 1974). Desta

forma, uma importante dimensão do modelo unificacionista assenta no seu potencial para "explicar o mundo natural, reduzindo fenómenos aparentemente não familiares a fenómenos familiares" (Friedman, 1974, p. 9). A teoria cinética corpuscular é um exemplo, pois fornece um enquadramento teórico que permite relacionar e explicar um conjunto de fenómenos naturais. Por exemplo, permite explicar como e porquê um balão expande quando exposto ao sol, mas também como e porquê um pneu de um carro retrai num dia de inverno. Situar um fenómeno em explicação num enquadramento teórico-conceitual maior reduz a sua arbitrariedade (Woodward, 1989).

Os modelos unificacionista e mecanicista podem interagir estreitamente. Enquanto o modelo unificacionista fornece o enquadramento teórico-conceitual para a explicação, o modelo mecanicista relata com base nesse enquadramento os mecanismos subjacentes ao fenómeno em explicação. Em conjunto, os dois modelos não só oferecem uma boa compreensão da estrutura lógica de uma explicação científica como se harmonizam com importantes objetivos da educação em ciência. O modelo unificacionista, porque procura explicar os fenómenos do mundo natural com base em ideias chave da ciência. Ou seja, consistente com a perspetiva valorizada na educação em ciência de levar os alunos a trabalharem em torno de ideias chave—"big ideas" (Harlen 2015, p.14)—que dão sentido e ajudam a compreender o mundo natural à sua volta. Adicionalmente, estudos empíricos na área da cognição (e.g., diSessa et al., 2004) têm mostrado que ideias ligadas são mais facilmente utilizadas em novas situações do que ideias dispersas. Por seu lado, o modelo mecanicista porque, na explicação de um fenómeno através dos seus mecanismos subjacentes, os alunos não aprendem apenas factos—tais como quando a temperatura de um gás aumenta a pressão constante o seu volume aumenta—mas envolvem-se num processo de descoberta de "como é que algo funciona". Neste processo são levados a raciocinar através de possíveis mecanismos e a testar qual aquele que melhor explicará o fenómeno em estudo (Krist et al., 2019; Russ et al., 2008).

### *Identificar as dimensões de uma "boa" explicação científica*

Após delinear uma definição operacional de explicação científica, o passo seguinte envolveu identificar as dimensões essenciais num referencial para caraterizar uma "boa" explicação científica. Nesta fase, e com o foco na definição operacional de explicação científica previamente delineada, foi realizada uma revisão de literatura acerca do raciocínio mecanicista (Machamer et al., 2000; Perkins & Grotzer, 2005; Russ et al., 2008) e em

múltiplos níveis (Wilensky & Resnick, 1999), bem como do raciocínio em química (e.g., Cooper, 2015; Taber & García-Franco, 2010; Talanquer, 2018a, 2018b). Comparando e sintetizando os resultados desta revisão foram identificadas quatro dimensões essenciais, nomeadamente: *relevância*, *enquadramento*, *mecanismo*, *múltiplos níveis escalares*.

A dimensão *relevância* tem por base que uma explicação científica deve apenas incluir os fatores que lhe são relevantes, ou seja, aqueles que são produtivos na sequência de eventos causais que produzem o fenómeno (Craver & Tabery, 2015). Identificar os fatores que são relevantes num determinado mecanismo é uma importante dimensão nos modelos mecanicistas (e.g., Craver & Tabery, 2015; Salmon, 1984; Strevens, 2008). Contudo, estudos empíricos revelam que é frequente os alunos terem dificuldades em identificar que fatores podem ser relevantes ou irrelevantes para propor uma explicação (Faria et al., 2014; Russ et al., 2008). A relevância foi assim considerada como uma das dimensões essenciais para uma "boa" explicação científica.

A dimensão *enquadramento* fundamenta-se na ideia de que uma "boa" explicação científica deve oferecer um enquadramento teórico-conceptual baseado nas ideias chave da ciência, conhecidas ou assumidas como verdadeiras. Consistente com o modelo unificacionista, uma "boa" explicação deve promover uma compreensão global do mundo natural em detrimento de uma compreensão restrita e localizada (Friedman, 1974; Kitcher, 1989), reduzindo fenómenos aparentemente desconexos num enquadramento teórico-conceptual global, ou unificado (Freidman, 1974). Atribuir um fenómeno em explicação a um determinado enquadramento teórico-conceptual é uma importante, embora complexa, componente na construção de explicações. Requer, por um lado, conhecer as ideias chave da ciência e, por outro, utilizar essas ideias para dar sentido e explicar os fenómenos da natureza (Braaten & Windschitl, 2011; Osborne & Patterson, 2011). De facto, muitas vezes, as explicações dos alunos são relatos teleológicos que revelam raciocínios intuitivos, omitindo um enquadramento teórico-conceptual adequado (Brewer et al., 1998; Kelemen, 1999). Esta é portanto uma dimensão a considerar para caracterizar uma "boa" explicação.

A dimensão *mecanismo* tem por base que o cerne de uma "boa" explicação são os mecanismos subjacentes ao fenómeno em causa, sendo o grau de complexidade desses mecanismos o que lhe confere a sua força explicativa (Grotzer & Tutwiler, 2014). É a dimensão mecanicista de uma explicação o que permite ir além da simples descrição de eventos e padrões num fenómeno para explicar como e porquê estes ocorrem (Machamer

et al., 2000). É também esta dimensão que promove uma compreensão mais profunda do mundo natural e a capacidade para lhe dar sentido (Kapon, 2017; McCain, 2015). Sabe-se que o ser humano é sensível à estrutura mecanicista de uma explicação, no sentido em que é capaz de distinguir entre as explicações aquela que apresenta um mecanismo mais completo (Kapon, 2017). Desde cedo os alunos desenvolvem o sentido de mecanismo e existem evidências de que em várias ocasiões podem apresentar explicações mecanicistas mais ou menos complexas (Grotzer, 2003). No entanto, na explicação de fenómenos mais complexos existe uma tendência para simplificar os mecanismos subjacentes. Nestas situações, as explicações dos alunos tendem a ser deterministas, lineares e centralizadas, negligenciando a existência de múltiplas causas que se relacionam na produção de um determinado efeito (Grotzer, 2003; Perkins & Grotzer, 2005; Talanquer, 2018b). É também frequente os alunos revelarem uma sobre-confiança em relatos tautológicos, i.e., relatos que simplesmente "re-descrevem" por outras palavras com significados semelhantes os eventos já apresentados (Solomon, 1986). Em química, onde apreciações acerca das propriedades e transformações da matéria dependem de múltiplos fatores, é comum os alunos apresentarem mecanismos simples ou fragmentados, i.e., sem uma ligação lógica e coerente entre os vários fatores (Talanquer, 2014). Desta forma, o atributo mecanicista de uma explicação constitui-se como uma dimensão essencial num referencial para caracterizar uma "boa" explicação científica.

Por último, a dimensão *múltiplos níveis escalares* assenta na ideia de que explicar um fenómeno através dos seus mecanismos subjacentes envolve pensar em diferentes níveis escalares e mover-se com fluidez entre eles (Levy & Wilensky, 2009; Resnick & Wilensky, 1999). Um fenómeno é o comportamento de um mecanismo como um todo (Machamer et al., 2000). O mecanismo compreende as entidades, as suas propriedades e atividades, e como estas se organizam de forma a produzirem determinadas alterações (Craver & Darden, 2013). Particularmente na química, onde a maioria dos fenómenos são emergentes, é necessário pensar em pelo menos dois níveis diferentes: o macroscópico, o nível onde ocorrem as transformações; e o submicroscópico, o nível das entidades que produzem essas transformações (Taber, 2013; Talanquer, 2011, 2018a). Pensar através de múltiplos níveis escalares é complexo, e especialmente nos anos de introdução à aprendizagem da química. É vasto o número de estudos empíricos que mostram que considerar a existência de entidades não observáveis, como o ar ser constituído por pequeníssimos corpúsculos, não é um passo que ocorra sem problemas (Johnson &

Papageorgiou, 2010; Solomonidou & Stavridou, 2000). Adicionalmente, é necessário distinguir aquilo que é uma visão holística do fenómeno da visão local das entidades participantes e suas interações. De facto, a literatura tem revelado que os alunos tendem a atribuir propriedades e processos do nível macroscópico às entidades do nível submicroscópico (e.g., Barke, Hazari, & Yitbarek, 2009; Kind, 2004; Margel et al., 2008; Taber & García-Franco, 2010). Por exemplo, quando uma alteração na cor, ou no volume, é entendida como também acontecendo ao nível molecular (Ben-Zvi et al., 1986; Nakhleh, 1992). Portanto, considerou-se a dimensão *múltiplos níveis* como essencial num referencial para uma "boa" explicação.

Em suma, estas quatro dimensões não só refletem importantes elementos estruturais de uma explicação científica como reflectem aspetos onde frequentemente os alunos têm dificuldades. Enquanto que as duas primeiras dimensões (*relevância* e *enquadramento*) reflectem o conteúdo conceptual da explicação, as duas ultimas (*mecanismos* e *múltiplos níveis escalares*) refletem a sua força explicativa. Assim, estas são quatro dimensões essenciais num referencial para caracterizar a natureza das explicações que os alunos constroem.

### *Construção do Sistema de análise*

Com as dimensões de uma boa explicação identificadas o passo seguinte foi a construção do sistema de análise com base nestas dimensões e nas explicações de 189 alunos (12—15 anos) do 8.º ano recolhidas através de um questionário. Neste questionário os alunos responderam a quatro questões, onde apresentaram explicações para quatro fenómenos relacionados com a natureza corpuscular da matéria. Mais à frente serão apresentados detalhes acerca do questionário, bem como do contexto da sua aplicação.

A análise das explicações dos alunos seguiu um processo iterativo de *top-down* e *bottom-up* (Chi, 1997). No processo de *top-down*, as explicações recolhidas foram inspecionadas e interpretadas à luz das dimensões previamente identificadas para uma "boa" explicação. No processo *bottom-up*, as explicações recolhidas foram inspecionadas para identificar os seus elementos relevantes.

As explicações dos alunos foram analisadas por questão, i.e., só depois de se inspecionar as respostas a uma questão é que se passou para a seguinte e assim sucessivamente. Numa primeira inspeção procedeu-se à exclusão das respostas inválidas.

Em seguida inspecionaram-se novamente todas as respostas consideradas válidas. Nesta fase as respostas foram inspecionadas com base nas dimensões *relevância* e *enquadramento teórico-conceptual*. Respostas que não apresentavam informação relevante para o fenómeno em estudo e que não consideravam um enquadramento teórico-conceptual foram atribuídas a um grupo de *não-explicações*. As restantes respostas formaram assim o grupo das *potenciais explicações*. As respostas incluídas no grupo das *potenciais explicações* foram re-inspecionadas, comparadas e contrastadas entre si (Strauss & Corbin, 1998) com o objetivo de identificar potenciais padrões. Nesta fase, o grupo das *potenciais explicações* foi dividido, formando dois novos grupos: *pseudo-explicações* e *explicações*. Cada um destes grupos foi então re-inspecionado e interpretado com base na dimensão *mecanismo*. Deste modo, respostas propondo um potencial mecanismo foram atribuídas ao grupo das *explicações*, e as restantes ao grupo das *pseudo-explicações*. Procedeu-se novamente a uma reinspeção, procurando-se agora evidências de *múltiplos níveis escalares*. Nesta fase, o grupo das *pseudo-explicações* foi dividido, formando dois novos grupos: *macro-descrições*—respostas não considerando outro nível para além do nível do fenómeno—e as *descrições-mistas*—respostas que considerando entidades ao nível submicroscópico lhe atribuem propriedades do nível macroscópico. Deste modo, as *macro-descrições* e as *descrições-mistas* passaram a fazer parte de um grupo maior, as *explicações descritivas*. Daqui procedeu-se novamente à reinspeção de todas as respostas não atribuídas ao grupo das *explicações descritivas*, tendo em conta o grau de complexidade dos seus potenciais mecanismos, com base em Perkins e Grotzer (2005). Desta fase, três novos grupos de explicações emergiram: *explicações associativas*—relatos que simplesmente enunciam leis ou regras; *explicações científicas simples*—explicações apresentando mecanismos simples ou fragmentados; e *explicações complexas*—explicações apresentando mecanismos que relatam de forma lógica e coerente as interações e relações entre múltiplos fatores e como estes produzem o fenómeno em questão.

Por fim, os cinco grupos de explicações que emergiram deste processo foram descritos quanto às suas características e organizados hierarquicamente, originando o sistema de análise. No sistema de análise construído, cada grupo de explicações representa um nível hierárquico de força explicativa. Os níveis de força explicativa vão desde a simples descrição do fenómeno à construção de um relato lógico e coerente. Este último, um relato com base nas ideias chave da ciência e que propõem os mecanismos

subjacentes pelos quais o fenómeno em explicação emerge. O produto final deste sistema de análise pode ser consultado no Artigo I (Anexo I). Neste sistema, em forma de chave dicotómica, para determinar o nível de uma explicação, esta é submetida a um conjunto de questões. Respondendo-se afirmativamente a essas questões, a explicação passa para um nível superior de força explicativa, e assim sucessivamente. Cada um destes níveis é fenomenológico, neles identificando-se aspetos das explicações escritas dos alunos. Estes níveis não evidenciam capacidades ou níveis de desenvolvimento do aluno. Por exemplo, a um aluno que construiu uma explicação complexa não lhe é atribuído uma capacidade de raciocinar de forma mecanicista. O propósito primário deste sistema é ser um instrumento de investigação para caracterizar de forma sistemática a natureza das explicações científicas dos alunos.

### **4.1.3 | Caracterização das explicações que os alunos constroem**

#### *O questionário: desenho e validação*

As explicações dos alunos foram recolhidas através de um questionário. O questionário compreendeu quatro itens acerca de quatro fenómenos relacionados com a natureza corpuscular da matéria, nomeadamente: separação de substâncias com diferentes densidades (Questão 1), dissolução do açúcar em água (Questão 2), condensação do vapor de água na superfície de uma lata (Questão 3), e expansão térmica de um gás (Questão 4). A seleção destes quatro fenómenos teve em conta:

- i) Os objetivos de aprendizagem do currículo nacional do ensino básico das ciências que os alunos participantes seguiam (MEC, 2013).
- ii) Fenómenos relacionados com ideias previamente abordadas durante as aulas de ciências físico-químicas e que proporcionassem a construção de explicações mecanicistas.
- iii) Fenómenos familiares aos alunos mas que não haviam sido discutidos explicitamente com os mesmos durante as suas aulas de ciências físico-químicas.

No questionário optou-se por colocar questões de resposta aberta, dando aos alunos participantes a liberdade para construírem as suas próprias respostas, em vez de selecionarem entre respostas pré-definidas pela investigadora (Swiff, 2006; Tuckman, 2012). Sendo o objetivo captar a autenticidade e riqueza das explicações que os alunos constroem, foi importante assegurar que as questões colocadas permitiriam a cada um decidir o que seria importante considerar nas suas respostas (Swiff, 2006). À exceção do



primeiro item (mais tarde excluído da análise), cada um dos itens do questionário envolveu duas questões, a primeira pedindo a criação de um desenho e a segunda a construção de uma explicação escrita. Questões pedindo a criação de um desenho foram colocadas de forma a levar os alunos a pensar e a criar um desenho ao nível submicroscópico, tipicamente: Imagina que conseguias ver os corpúsculos constituintes da matéria, desenha o que observarias (...). As questões envolvendo a construção de uma explicação escrita foram colocadas de forma a reflectir questões do tipo como e porquê, que promovessem a oportunidade de levar os alunos a pensarem para além do nível do fenómeno e a utilizarem os seus desenhos para construir as suas explicações, tipicamente: com base no teu desenho, explica agora como e porquê o fenómeno (....) terá ocorrido.

O questionário foi validado externamente por um grupo de investigadores em educação na especialidade de didática das ciências e por um grupo-piloto de alunos do 8.º ano de escolaridade (Tukcman, 2012). O objetivo da validação externa foi assegurar que do questionário se obteriam respostas que permitissem captar a natureza das explicações científicas dos alunos, certificando-se que as questões colocadas seriam suficientemente claras de entender, por exemplo, ao nível da linguagem, tendo em conta a média de idades e o nível de escolaridade dos alunos participantes.

### *Participantes e contexto da aplicação do questionário*

Este estudo foi conduzido em duas escolas do ensino básico da região da Grande Lisboa, designadas por Escola C e I. A amostra total consistiu em 189 alunos (97 sexo feminino) do 8.º ano de escolaridade, com média de idades de 13 anos. Tanto na Escola C como na Escola I, todas as turmas tinham a mesma professora de ciências físico-químicas. Estas duas professoras (professora da Escola C e professora da Escola I) apresentavam um percurso académico e profissional semelhante. A Tabela 1 apresenta uma caracterização sumária das escolas, professoras e alunos participantes.

Tabela 1 | Caracterização sumária das escolas, professoras e alunos participantes.

| <i>Escolas e professoras</i>                                                                                                                                                                                                                                       | <i>Alunos</i>                                                                                                                    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Escola C: escola do ensino público português na região da Grande de Lisboa.</li> <li>• Uma professora, sexo feminino, com 18 anos de prática profissional, a frequentar o doutoramento em educação em ciência.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Cinco turmas, 103 alunos (58 do sexo feminino); idade M = 13 anos, SD = .76)</li> </ul> |

- 
- Escola I: escola do ensino público português na região da Grande de Lisboa.
  - Uma professora, sexo feminino, com 14 anos de prática profissional, doutorada em educação em ciência.
  - Três turmas, 86 alunos (45 do sexo feminino); idade  $M = 13$  anos,  $SD = .72$
- 

O questionário foi aplicado respetivamente por cada uma das professoras (Escola C e Escola I), na presença da investigadora, durante uma aula de ciências físico-químicas de 45 minutos. Ambas as professoras seguiram o mesmo procedimento (previamente discutido entre a investigadora e as professoras) que consistiu nos seguintes momentos:

i) Discussão com a turma sobre o que é uma explicação no contexto da ciência e da sua importância para o conhecimento do mundo natural. O objetivo foi clarificar o sentido do conceito de explicação em ciência. Com efeito, é frequente os alunos encontrarem termos, como descreve, justifica, explica, etc., que são usados de forma arbitrária, sendo que o termo explica muitas vezes envolve simplesmente descrever uma ideia, apresentar a definição de um conceito, ou justificar uma determinada opção (Braaten & Windschitl, 2011; Brewer et al., 1998).

ii) Construção com a turma de uma explicação científica para o fenómeno da difusão do aroma de um perfume. Numa discussão em turma, os alunos foram solicitados a descrever o que perceberiam/sentiriam durante este fenómeno. Seguidamente, a professora colocou questões, como: O que acham que acontece para que um cheiro se espalhe?; Do que falámos nas aulas, o que pode explicar este fenómeno; Como é constituído o ar? E o perfume?

iii) Realização individual do questionário. Nesta fase, o papel da professora foi dar as indicações de como deveriam proceder e clarificar, ocasionalmente, o sentido ou significado de algumas frases ou palavras. A investigadora observou todas as aulas em que o questionário foi aplicado, assumindo um papel de observadora não interveniente (Cohen et al., 2007), clarificando esporadicamente aspetos relativos à aplicação do questionário.

### *Codificação das explicações escritas dos alunos*

De forma a responder ao segundo objetivo deste estudo—caracterizar a natureza das explicações que os alunos do 8.º ano constroem—, o sistema de análise construído foi utilizado para codificar as explicações recolhidas através das respostas aos itens 2, 3 e 4 do questionário (o item 1 foi excluído devido a um erro na versão final do questionário entregue aos alunos). Apesar de terem sido recolhidos 189 questionários, cada uma das

questões analisadas teve um número divergente de respostas válidas (Questão 2—88%; Questão 3—81%; e Questão 4—75% de respostas válidas). As respostas consideradas como não válidas foram respostas, ou deixadas em branco ou cujo conteúdo não era perceptível, ou que não faziam qualquer sentido no âmbito da pergunta (respostas nulas). Todas as explicações escritas válidas foram codificadas pela investigadora utilizando o sistema de análise desenvolvido (sistema de análise disponível no Artigo I no Anexo I). Todas as explicações escritas dos alunos foram codificadas como *descrição-macro*, *descrição-mista*, *associativa*, *explicação-simples* e *explicação-complexa*. De forma a criar uma variável quantitativa, foi atribuída uma pontuação numérica de 0 (para o nível *não-explicação*) a 5 (para o nível *explicação-complexa*) a cada código.

### *Inter-codificação das respostas dos alunos*

Determinou-se a fiabilidade na decisão de atribuição, ou não, de uma resposta a um determinado nível de força explicativa através da avaliação da fiabilidade entre codificadores (Cohen et al., 2007; Tuckman, 2012). A avaliação da fiabilidade de inter-codificadores permite assegurar que outro investigador perante as mesmas respostas, com o mesmo enquadramento conceptual, as codifica da mesma forma (Cohen et al., 2007). Avaliou-se a fiabilidade inter-codificadores calculando o rácio entre o número de acordos e o número de possíveis acordos (Cohen et al., 2007). Neste processo, um segundo e terceiro investigadores foram envolvidos utilizando o sistema de análise para codificar 10% das respostas escolhidas aleatoriamente. Os resultados da fiabilidade de inter-codificadores e resoluções quanto às diferenças podem ser consultados no Artigo I (Anexo I). No final deste processo obteve-se um consenso total.

### *Análise quantitativa das explicações escritas dos alunos*

O sistema de análise permitiu a transformação dos dados qualitativos do questionário em dados quantitativos, tornando possível proceder a uma análise estatística dos dados recolhidos. Foi realizada uma estatística descritiva das respostas dos alunos, calculada a correlação das respostas dos alunos usando o coeficiente de correlação *Spearman's rank*, e comparada a distribuição dos níveis de força explicativa para cada questão usando o teste não paramétrico de *Friedman* para amostras emparelhadas.

#### 4.1.4 | Principais Resultados da análise das explicações dos alunos

O resultado da análise das explicações dos alunos, utilizando o sistema desenvolvido neste estudo, revelou que apenas um número reduzido de alunos (3% de *explicações científicas* na Questão 2; 0% na Questão 3; e 4% na Questão 4) apresentou uma explicação com nível explicativo superior, i.e., um relato que identifica e usa ideias chave relevantes para propor um mecanismo que explica como e porquê o fenómeno em causa ocorre. Uma perspetiva geral da distribuição das explicações dos alunos através dos seus níveis de força explicativa é ilustrada no Artigo I (Anexo I).

A maioria das explicações situou-se no nível descritivo (68% *explicações descritivas* para a Questão 2; 36% para a Questão 3; e 50% para a Questão 4), i.e., respostas onde não são propostos possíveis mecanismos. Sendo que para o fenómeno da dissolução (Questão 2) e da condensação (Questão 3), a maioria destas explicações descritivas encontrava-se no nível macroscópico, não indicando quaisquer entidades ou fatores no nível inferior ao do fenómeno (dos relatos descritivos, 61% na Questão 2; 88% na Questão 3; e 34% na Questão 4 são *descrições-macro*). Contudo, para o fenómeno da expansão térmica, mais explicações indicavam a presença de entidades ao nível submicroscópico, e.g., que o ar é constituído por corpúsculos (dos relatos descritivos, 66% na Questão 4 são *descrições-mistas*). No entanto, nestas explicações os alunos atribuíram às entidades do nível submicroscópico propriedades do nível macroscópico e, portanto, estas explicações falharam em propor um possível mecanismo, continuando ao nível de um relato descritivo.

Observou-se ainda que, alguns alunos apresentaram explicações que não passaram do enunciado de leis ou regras, sem, no entanto, as utilizarem para propor um possível mecanismo; por isso, são explicações que associam ideias, enquadrando o fenómeno em explicação num referencial teórico-conceitual relevante, mas sem apresentarem um possível mecanismo (13% *explicações associativas* para a Questão 2; 9% para a Questão 3; e 22% para a Questão 4).

Adicionalmente, da reduzida percentagem de respostas no nível *explicação científica*, a maioria foram *explicações simples* (2% para a Questão 2; e 4% para a Questão 4), onde uma causa é diretamente atribuída a um efeito, ou o mecanismo é fragmentado; e uma menor percentagem foram explicações complexas, onde múltiplos fatores são considerados e relacionados para propor um mecanismo que relata de forma lógica e coerente como e porquê o fenómeno ocorre (1% de *explicações complexas* para a Questão 2; e 1% para a Questão 4).

Ainda a análise das explicações escritas dos alunos revelou que estas dependem do fenómeno em causa. A diferença das explicações dos alunos, para os três fenómenos, foi estatisticamente significativa para um nível de confiança de 95% ( $\chi^2(2) = 58,601$ ;  $p = 0.000$ ). Mais não foi encontrada uma correlação significativa entre as explicações dos alunos para cada um dos fenómenos ( $R_s Q2-Q3 = 0,237$ ;  $R_s Q2-Q4 = 0,350$ ;  $R_s Q3-Q4 = 0,356$ ). Por exemplo, relativamente ao fenómeno da dissolução do açúcar e da condensação do vapor de água (Q2) numa superfície fria (Q3), mais alunos apresentaram descrições ao nível do fenómeno, não considerando quaisquer entidades ao nível do submicroscópico. No entanto, para o fenómeno da expansão térmica de um gás (Q4), uma percentagem maior de alunos considerou o ar como sendo constituído por partículas e o facto destas serem entidades chave na explicação do fenómeno.

## **4.2 | Estudo II — O uso de desenhos na construção de explicações científicas: um estudo com alunos do 8.º ano**

### **4.2.1 | Racional do Estudo II**

No primeiro estudo desta investigação desenvolveu-se um referencial para analisar as explicações que os alunos constroem e caracterizou-se a natureza das explicações de alunos do 8.º ano para fenómenos relacionados com a natureza corpuscular da matéria. Os resultados do primeiro estudo mostraram que uma larga maioria dos alunos tende a construir relatos que simplesmente descrevem os eventos ao nível do fenómeno. As explicações dos alunos que vão além do nível do fenómeno, considerando entidades ao nível submicroscópico, tendem a descrever as propriedades destas entidades com base em propriedades do nível macroscópico. Esta confusão entre níveis é reportada em vários estudos empíricos (e.g., Becker, Noyes, & Cooper, 2016; Moreira, Marzabal, & Talanquer, 2018; Rappoport & Ashkenazi, 2008; Samon & Leyv, 2017; Talanquer, 2010), sendo atribuída à dificuldade dos alunos em compreender aspetos da natureza sistémica dos fenómenos da química, como a natureza corpuscular da matéria. Mais, os resultados do primeiro estudo mostraram explicações que são relatos de teorias ou leis da ciência, sem contudo serem utilizadas para dar sentido às interações entre as entidades do nível submicroscópico e, logo, sem as considerar para construir uma explicação de como e porquê o fenómeno ocorre. Estes resultados apontam para a necessidade de genuínas oportunidades para envolver os alunos na prática de construir explicações e providenciar ferramentas adequadas que apoiem o seu raciocínio na descoberta dos mecanismos subjacentes aos fenómenos em explicação.

Até à data deste estudo, escassos estudos empíricos sugeriam estratégias para promover e apoiar a construção de explicações científicas na sala de aula de ciências (Tang, 2016). No entanto, um conjunto de estudos, nomeadamente na área da elaboração de argumentos (McNeill et al., 2006; Songer & Gotwals, 2012), mostrava os benefícios do uso de estratégias de apoio adequadas para guiar os alunos no desenvolvimento de raciocínios mais complexos. Adicionalmente, um conjunto de estudos empíricos começavam a reportar os benefícios da criação de desenhos para representar modelos e diagramas como ferramenta de apoio à compreensão e explicação de fenómenos complexos, como o caso dos fenómenos relacionados com a natureza corpuscular da matéria (Prain et al., 2009; Schwarz et al., 2009).

Face a esta lacuna e reconhecendo a importância de apoiar os alunos na construção de "melhores" explicações científicas, desenvolveu-se uma estratégia didática para guiar e apoiar a construção de explicações científicas com base na criação de desenhos em múltiplos níveis escalares (i.e., nível macroscópico e submicroscópico). O Estudo II desta tese teve como objetivos i) examinar o progresso dos alunos em relação aos seus desenhos e explicações após a aplicação desta estratégia; bem como ii) examinar a associação entre a representação no desenho de determinados elementos conceituais (i.e., estrutura, movimento e interações) e o nível de força explicativa das explicações dos alunos.

Em seguida apresenta-se o racional e o desenho da estratégia didática, o contexto da sua implementação, os métodos de recolha e análise de dados, por fim, apresenta-se uma síntese dos principais resultados do Estudo II.

#### **4.2.2 | Racional e desenho da sequência didática para a construção de "melhores" explicações científicas**

O desenvolvimento da estratégia de apoio à construção de explicações científicas envolveu duas fases. Numa primeira fase foram sintetizados os resultados do Estudo I tendo em conta a natureza das explicações científicas que os alunos constroem, focando a identificação de pontos críticos para construção de "melhores" explicações. Numa segunda etapa, com o foco nos pontos críticos identificados, foi realizada uma revisão da literatura em educação em ciência, e, particularmente, no domínio da química, com o objetivo de identificar estratégias e ferramentas que pudessem potencialmente apoiar os alunos na construção de "melhores" explicações.

Primeiro, sintetizando-se os resultados do Estudo I identificaram-se os seguintes aspetos críticos:

- I. Não considerar entidades no nível inferior ao do fenómeno, i.e., o nível submicroscópico.
- II. Raciocinar de modo intuitivo acerca das entidades submicroscópicas, inferindo as suas propriedades e/ou processos em que participam directamente dos comportamentos percecionados ao nível macroscópico, falhando assim em estabelecer uma ligação coerente entre o nível macroscópico (nível do fenómeno) e o nível submicroscópico (nível do mecanismo).
- III. Reduzir a complexidade das relações de causalidade num mecanismo a um número restrito de fatores que atuam de forma linear.

Segundo, na literatura em educação no domínio da química, estratégias que proporcionem aos alunos oportunidades para observar os fenómenos e representá-los formalmente tanto ao nível macroscópico como ao nível submicroscópico, são valorizadas por promoverem uma melhor compreensão dos níveis escalares da química e por ajudarem a vincular e ligar estes níveis (Chang et al., 2014; Marge et al., 2008; Taber, 2013).

Adicionalmente, a criação de desenhos tem vindo a ser sugerida como uma ferramenta com potencial para a construção de modelos (Schwarz et al., 2009) e para apoiar os alunos na compreensão de conceitos complexos, tornando possível a sua externalização num meio material, podendo ser manipulados e usados para pensar acerca dos mesmos e comunicá-los de forma mais efectiva (Parnafes, 2010, 2012).

Com base nestes aspetos desenvolveu-se uma estratégia didática de apoio à construção de explicações científicas envolvendo quatro fases, que no fundo correspondem a quatro atividades epistémicas na prática de construir explicações científicas. Esta estratégia foi desenvolvida para proporcionar aos alunos a oportunidade de criar os seus próprios desenhos em múltiplos níveis escalares, de se envolverem numa aprendizagem activa e colaborativa (Chi & Wylie, 2014), e de proporcionar experiências multi-sensoriais (Langbeheim & Levy, 2018; Park & Song, 2020). Através desta estratégia, os alunos foram levados a iniciar a explicação de um fenómeno através da observação e descrição do mesmo, e apoiados cuidadosamente na transição para o nível submicroscópico através da criação de desenhos que os pudessem levar a raciocinar através dos mecanismos subjacentes ao fenómeno em explicação.

De seguida apresentam-se as atividades envolvidas na estratégia didática, bem com os pressupostos que as sustentaram.

*Observação*—na primeira fase desta estratégia é proporcionado aos alunos um contacto directo com o fenómeno sob investigação, por exemplo, através da condução de uma atividade laboratorial planificada pelos alunos que terá partido da exploração de uma questão de investigação. Observar e explorar os fenómenos do mundo natural é uma atividade fundamental na prática científica (NCR, 2012). Segundo a perspetiva cognitiva, acredita-se que manipulações no ambiente ajudam a focar a atenção (Barsalou, 2008; Krueger, 2012). Ao envolver os alunos num contacto directo com o fenómeno através da planificação e condução de atividades laboratoriais, por um lado, pretendeu-se proporcionar oportunidades para se envolverem em práticas idênticas às que os cientistas se envolvem para conhecer e explicar o mundo natural, e, por outro, pretendeu-se promover uma aprendizagem activa (Chi & Wylie, 2014) e rica em experiências multi-



sensoriais (Barsalou, 2008), aspetos críticos para a componente cognitiva e afectiva da aprendizagem.

*Descrição*—esta fase envolve a criação de um desenho ilustrando as observações realizadas. Na sua prática, os cientistas podem começar com a descrição de padrões e de relações identificadas através da cuidadosa observação de um fenómeno como ponto de partida para investigar o mecanismo que o produz, ou podem começar por descrever os fenómenos como previsões, baseadas no conhecimento prévio dos seus fatores relevantes (Russ et al., 2008). Ao levar os alunos a descrever as suas observações através da criação de um desenho pretendeu-se proporcionar-lhes oportunidades para explorarem e questionarem determinados aspetos do fenómeno em estudo que lhes parecessem relevantes e que carecessem de uma explicação. Por exemplo: Que aspetos observados podem ter interesse para explicar o fenómeno? Como posso representar e organizar estes aspetos no meu desenho para salientar o que é importante? Que padrões ou relações entre os aspetos observados devem ser descritos para mais tarde investigar como e porquê acontecem? Adicionalmente, o desenho criado fornece um artefacto físico que os alunos podem usar como ponto de partida para o processo de descoberta dos fatores subjacentes ao fenómeno em estudo. Espera-se assim criar oportunidades para que os alunos comecem a questionar: Como posso explicar o que está aqui a acontecer?; Que entidades estarão envolvidas neste processo que produzem o fenómeno?. Mais tarde, na construção de uma explicação, o desenho ao nível do fenómeno pode servir de ponto de apoio para estabelecer a ligação entre o nível dos mecanismos e o nível do fenómeno, uma ligação crítica para completar o ciclo de uma explicação (Levy & Wilensky, 2009a, 2009b). Através da comparação de desenhos a vários níveis, os alunos podem ser levados a colocar questões como: "Em que atividades estas entidades, com estas propriedades, estariam envolvidas de modo a produzir o que eu observei para este fenómeno?" ou "Se estas entidades interagissem desta forma seriam estas as transformações observadas?" A literatura em filosofia da ciência (Machamer et al., 2000), como em educação em ciência (Russ et al., 2008; Southard et al., 2017) sugere que esboçar este género de questões leva a um produtivo processo iterativo de avaliação e revisão de um mecanismo para um fenómeno.

*Interpretação*—esta fase envolve a criação de um desenho no nível inferior ao do fenómeno, i.e., o nível do mecanismo. No caso da química, este nível envolve a escala submicroscópica, ou seja, o nível dos átomos, moléculas, etc. A criação de modelos em química é uma prática frequente. Uma vez que a química lida com escalas não observáveis e imperceptíveis, os químicos constroem modelos para pensar e comunicar o seu processo

de descoberta e para explicar os mecanismos subjacentes aos fenômenos em estudo (Kozma et al., 2000; Nersessian, 2008). Ao envolver os alunos na criação de desenhos ao nível submicroscópico pretendeu-se apoiar um passo crítico na construção de uma explicação científica, que é considerar a existência de um nível inferior ao do fenómeno, o qual tem de ser identificado e caracterizado de modo a compreender e explicar o fenómeno em estudo (Wilensky & Resnick, 1999). Criar um desenho implica identificar os elementos a representar, bem como a sua forma, estrutura e posição relativa (Tversky & Suwa, 2009). Desta forma, pedir aos alunos um desenho ao nível submicroscópico tem como propósito levá-los a considerar que as substâncias a representar são constituídas por entidades como átomo e moléculas. Uma vez consideradas estas entidades, torna-se necessário pensar como representar as suas propriedades e as suas interações, e relações no espaço e no tempo. Desta forma, os desenhos criados podem funcionar como modelos provisórios de como as entidades do sistema se comportam e interagem entre si. Espera-se então que estes modelos possam ser utilizados para construir uma explicação de como e porquê o fenómeno em estudo ocorre.

*Explicação*—é pedido aos alunos para apresentarem a sua explicação científica. Nesta fase espera-se que tragam os eventos que descreveram ao nível macroscópico e os mecanismos inferidos ao nível submicroscópico para delinear um relato lógico e coerente de como e porquê o fenómeno ocorreu. Neste processo, eventualmente, os alunos encontraram lacunas na lógica do seu relato ou eventuais inconsistências na forma como uma determinada atividade ou processo se desenrola para dar origem a determinados eventos. Com efeito, espera-se que ao encontrarem falhas e inconsistências na construção das suas explicações, os alunos voltem aos seus desenhos para as resolver e, então, de forma mais focada, repensar o papel de um determinado fator ou eventualmente identificar novos fatores. Neste processo iterativo espera-se que os alunos vão desenvolvendo melhores explicações com base em modelos cada vez mais completos (Parnafes, 2012).

### **4.2.3 | Métodos**

#### *Participantes e contexto da implementação da estratégia didática para a construção de "melhores" explicações científicas*

Este estudo foi realizado com as cinco turmas da Escola C que haviam participado no Estudo I (informação sobre as escolas e turmas é apresentada no Estudo I, subsecção: Contexto da aplicação do questionário). Esta foi uma amostra de conveniência, tendo em

conta critérios como a disponibilidade da professora das turmas para investir os esforços necessários para participar no estudo e aprender acerca da estratégia didática a implementar, número de turmas do 8.º ano atribuídas à professora, e a localização da escola. Participaram no presente estudo 103 alunos do 8.º ano (56% do sexo feminino; idade  $M = 13$  anos,  $SD = .76$ ). Os participantes formaram um grupo homogéneo em termos do seu contexto sócio-económico e percurso escolar. Segundo a descrição da professora, de forma geral, estes alunos mostravam envolvimento nas aulas de ciências físico-químicas. A sua avaliação no final do período, que antecedeu este estudo, foi em média de 3 valores (numa escala de 1 a 5) ( $M(103) = 2.99(.778)$ ). A média de retenções por turma era de 1 retenção. Todos os participantes tinham o português como primeira língua. Conforme descrito pela professora, estes alunos interagem frequentemente com representações visuais (diagramas, animações ou vídeos) disponíveis no seu livro ou providenciadas pela professora. No entanto, nenhum dos participantes tinha experiência na criação de desenhos como forma de criar modelos para dar sentido e explicar fenómenos da química.

A estratégia desenvolvida, para apoiar a construção de explicações, foi implementada ao longo de uma unidade do currículo nacional do ensino das ciências dedicado ao estudo da natureza corpuscular da matéria e das reações químicas (MEC, 2013). A sua implementação em sala de aula compreendeu um conjunto de sete tarefas de investigação. No seu todo, esta intervenção envolveu 28 aulas de 45 minutos cada (uma média de três por semana), o que correspondeu a um período escolar. Tipicamente cada tarefa estendeu-se por três a quatro aulas. A aplicação de cada uma das tarefas na sala de aula seguiu os seguintes momentos:

*Introdução do tema da tarefa*—a professora realiza uma breve apresentação e discussão do tema da tarefa com a turma, seguindo-se a comunicação de um conjunto de indicações quanto à sua realização e eventual esclarecimento de dúvidas.

*Exploração do fenómeno*—os alunos, em grupo, partindo de uma questão de investigação, desenharam e conduziram uma atividade laboratorial que lhes permitia explorar o fenómeno em estudo.

*Criação de desenhos e explicação*—os alunos, em grupo, criaram desenhos ao nível do fenómeno (envolve o nível macroscópico) e ao nível dos mecanismos (envolve o nível submicroscópico), e constroem uma explicação escrita para o fenómeno em estudo.

*Conclusão*—A professora seleciona alguns desenhos e explicações, e conduz uma discussão em turma com base nesses desenhos e explicações.

As aulas foram lecionadas pela professora de ciências físico-químicas das turmas participantes. Esta professora, à data do estudo, tinha 18 anos de prática profissional e encontrava-se a realizar o doutoramento em didática das ciências. O seu papel como professora foi facilitar a realização das tarefas propostas e guiar as aprendizagens dos alunos. Como facilitadora, estruturou cada aula, introduzindo cada momento das tarefas propostas, convidando os alunos a participar e clarificando ou elaborando acerca de aspetos que eventualmente suscitaram dúvidas. Como guia das aprendizagens dos alunos, interveio sempre que necessário para melhorar a compreensão dos alunos, apoiar seu progresso ou desafiar a sua compreensão quando estes pareciam impedidos de avançar ou fixos a uma compreensão parcial. Estas intervenções, tipicamente, envolveram colocar questões ou conduzir breves discussões localizadas. A forma de trabalho dos alunos, ao longo destas aulas, foi em grupos de 3 a 4 elementos. A razão para o trabalho em grupo teve como objetivo criar um ambiente de trabalho descontraído, no qual os alunos pudessem expressar as suas ideias com um mínimo de estímulos exteriores, e onde essas ideias pudessem ser desafiadas, levando-os a ir mais longe nos produtos do seu trabalho. Os grupos foram selecionados pela professora que estava a trabalhar com estes alunos pelo segundo ano consecutivo. Os critérios utilizados foram a constituição de grupos mistos em termos de conhecimentos e competências, boa comunicação e bom ambiente de trabalho entre os elementos do grupo. Desta forma, os produtos produzidos pelos alunos, desenhos e explicações, foram sempre co-construções.

A maioria (80%) das 28 aulas que compreenderam esta intervenção foram observadas pela investigadora, que assumiu um papel de observadora não interveniente (Cohen et al., 2007). Ocasionalmente, a investigadora abordou os alunos com o intuito de solicitar informação adicional, concretamente, certos elementos nos seus desenhos aos quais seria difícil dar sentido mais tarde.

### *Recolha de dados*

No Estudo II, e após a implementação da estratégia didática com base na criação de desenhos a múltiplos níveis escalares para apoiar a construção de explicações científicas, examinou-se a progressão nas explicações e nos desenhos dos alunos. A recolha de dados

foi feita a partir de um mesmo questionário aplicado em dois momentos: i) Momento T1—antes da implementação da estratégia; e ii) Momento T2—após implementação da estratégia (Figura 3).

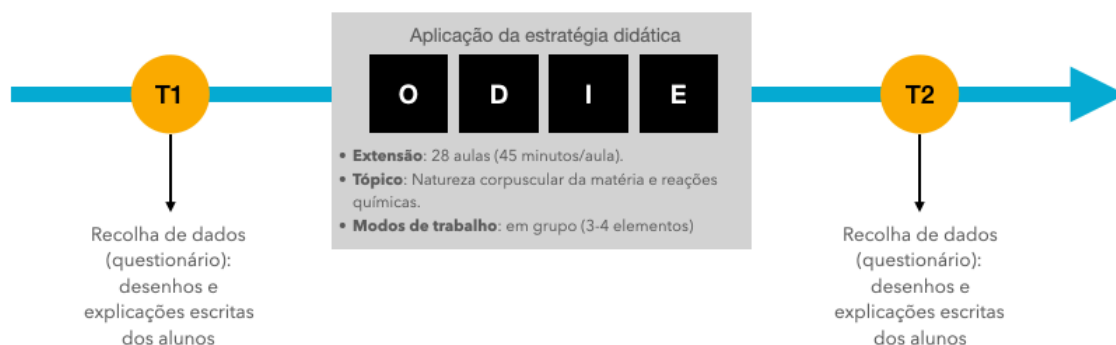


Figura 3. Momentos de recolha de dados do Estudo II.

O questionário aplicado (ver Estudo I na subsecção: *Contexto da aplicação do questionário*) envolveu a criação de desenhos ao nível submicroscópico e explicações escritas para fenómenos relacionados com a natureza corpuscular da matéria. O presente estudo focou-se num dos itens desse questionário: O fenómeno da dissolução do açúcar em água. Optou-se pela escolha específica deste item porque, em primeiro lugar, foi o item com maior taxa de respostas válidas para o momento T1 e momento T2. Segundo, porque, este foi o item com menor percentagem de *não-explicações* para o momento T1. Este aspeto é relevante porque, pretendendo-se examinar a progressão na construção de explicações científicas, será importante partir de relatos que, embora ainda não sendo potenciais explicações, situem o fenómeno em explicação numa determinada classe de fenómenos (ou quadro teórico-conceitual) para daí partir para a descoberta dos seus mecanismos subjacentes. Adicionalmente, este item, relativamente ao fenómeno da expansão térmica de um gás (segundo item com menor percentagem de *não-explicações*), apresentou uma percentagem superior de relatos ao nível da descrição macroscópica. Este aspeto é relevante, uma vez que permite perceber de que forma progridem explicações que num primeiro momento não consideraram o nível inferior ao do fenómeno, uma dimensão essencial para começar a pensar acerca de possíveis mecanismos.

Todos os participantes neste estudo completaram o questionário (n=103) nos dois momentos T1 e T2. No total, foram recolhidos para análise 92 desenhos e 98 explicações escritas no momento T1, e 95 desenhos e 91 explicações no momento T2 (respostas válidas). As respostas não válidas decorreram de dois fatores, ou os alunos não responderam, considerando-se estas respostas como respostas em branco, ou apresentaram respostas não perceptíveis que, portanto, foram consideradas como nulas.

### *Codificação dos dados*

*Explicações escritas*—a codificação das explicações dos alunos seguiu o processo descrito anteriormente no Estudo I, subsecção 4.1.3, no ponto *Codificação das explicações escritas dos alunos*.

*Desenhos dos alunos*—os desenhos dos alunos foram codificados pela investigadora utilizando um esquema de codificação (ver Artigo II no Anexo II) que emergiu de uma análise *bottom-up* dos desenhos dos alunos (Chi, 1997), que permitiu identificar e descrever certos elementos aí presentes. Desta análise emergiram três elementos: *estrutura* (S)—reflete o modo como os alunos representam aspetos da estrutura das entidades do sistema (e.g., partículas, átomos, ou moléculas), tais como o seu tamanho, a forma e a posição relativa no espaço; *movimento* (M)—reflete o modo como os alunos representam o movimento das entidades; e *interações* (I)—reflete o modo como os alunos representam as atividades/interações das entidades do sistema. Posteriormente, foram atribuídos três níveis de desempenho para a representação de cada um destes elementos. Esta fase seguiu um processo iterativo que envolveu, por um lado, a análise *top-down* informada por literatura relevante acerca das conceções dos alunos relativamente à natureza corpuscular da matéria (e.g., Merritt, Krajcik, & Schwarz, 2008; Sevan & Stains, 2013; Talanquer, 2009) e, por outro, a análise *bottom-down* com base na descrição dos elementos presentes nos desenhos dos alunos. Desta forma, ao elemento *estrutura* (S) foram atribuídos os níveis: *estrutura macro*, *mista* e *submicro*; ao elemento *movimento* (M) foram atribuídos os níveis: *estático*; *causado*; *intrínseco*; e ao elemento *interações* (I) foram atribuídos os níveis: *nenhuma*, *simples* e *múltiplas*. Uma descrição detalhada de cada elemento e respetivos níveis de desempenho é apresentada no Artigo II (Anexo II). De forma a criar uma variável quantitativa foi atribuída uma pontuação de 0 a 2 para cada nível de desempenho de cada elemento (representações mais alinhadas com os modelos canónicos da ciência receberam a pontuação de 2, e menos alinhadas de 0, por exemplo, a um desenho que represente o

elemento estrutura de forma macro é atribuído o valor de 0 pontos e a um desenho que represente múltiplas interações é atribuído 2).

### *Inter-codificação*

*Explicações escritas*—calculou-se a fiabilidade entre dois codificadores utilizando o coeficiente kappa de Cohen (Cohen et al., 2007). Obteve-se uma fiabilidade de 0.83. Após discussão foi obtido um acordo total (mais detalhes são apresentados no Artigo II, no Anexo II).

*Desenhos dos alunos*—calculou-se a fiabilidade entre dois codificadores utilizando o coeficiente kappa de Cohen (Cohen et al., 2007). Obteve-se uma fiabilidade de 0.85 para o *elemento estrutura*, 0.87 para o *movimento*, e 0.80 para as *interações*. Após discussão foi obtido um acordo total (mais detalhes são apresentados no Artigo II, no Anexo II).

### *Análise de dados*

Para dar resposta ao primeiro objetivo do Estudo II—examinar o progresso nas explicações e desenhos dos alunos após a aplicação da estratégia didática baseada em desenhos— foram primeiro calculadas as estatísticas descritivas das respostas dos alunos nos momentos T1 e T2, de forma a obter uma imagem global dos seus desenhos e explicações escritas neste dois momentos (Cohen et al., 2007). Em segundo lugar, utilizou-se um conjunto de testes não paramétricos para amostras emparelhadas de *Wilcoxon* para explorar as diferenças entre os desenhos e explicações dos alunos nos momentos T1 e T2.

Para dar resposta ao segundo objetivo do Estudo II—examinar a associação entre a representação no desenho de determinados elementos e o nível de força explicativa das explicações escritas dos alunos— foram calculados, para os momentos T1 e T2, os coeficientes de correlações rho ( $\rho$ ) de *Spearman* entre os elementos (*estrutura*, *movimento* e *interações*) dos desenhos e o nível explicativo das explicações escritas dos alunos.

## **4.2.4 | Principais Resultados do Estudo II**

### *Diferenças nos desenhos e nas explicações dos alunos, antes e após a intervenção*

Os *desenhos dos alunos* foram significativamente melhores do momento T1 para o momento T2, em cada um dos três elementos considerados: *estrutura* (S) ( $W_s = 406.000$ ,  $z$

= -5.013,  $p = .000$ ); *movimento* (M) ( $W_s = 684,000$ ,  $z = -5,174$ ,  $p = 0,000$ ); e *interações* (I) ( $W_s = 1225,000$ ,  $z = -6,761$ ,  $p = 0,000$ ).

Relativamente ao elemento *estrutura*, no momento T2, quase todos os alunos (98%) representaram as substâncias envolvidas como uma estrutura descontínua com espaços vazios (*estrutura submicro*). Isto contrasta com a proporção de alunos (33%) que, no momento T1, desenharam *estruturas mistas*, onde a matéria é representada como constituída por aglomerados de partículas, que não são em si as entidades constituintes da matéria, mas pequenas partes da matéria incorporadas num meio contínuo. Quanto ao elemento *movimento*, no momento T1, na maioria dos desenhos (87%) as entidades corpusculares constituintes das substâncias eram representadas como entidades estáticas. No momento T2, apesar da maioria dos alunos (53%) continuar a não representar movimento, mais alunos (33%) desenharam representações de corpúsculos com movimento intrínseco (apenas 5% dos alunos o fez no momento T1). Relativamente ao elemento *interações*, no momento T2, a proporção de alunos (67%) que considerou pelo menos uma interação relevante foi maior do que no momento T1 (43%). Além disso, foi maior a percentagem de alunos que representou *múltiplas interações* (20%), contrastando com a escassa percentagem de alunos (1%) que o fez no momento T1. Exemplos ilustrativos de como os desenhos dos alunos eram no momento T1 e T2 são apresentados nos resultados do Artigo II (Anexo II).

As explicações dos alunos foram significativamente melhores do momento T1 para o momento T2 ( $W_s = 2485.000$ ,  $z = -7.453$ ,  $p = .000$ ). No momento T1, 44% dos alunos apresentou relatos que são descrições macroscópicas do que acontece na dissolução do açúcar na água (nível macro-descritivo); enquanto no momento T2, apenas 18% dos alunos apresentou relatos a este nível. Após envolvidos na estratégia didática (momento T2), mais alunos propõem mecanismos para o fenómeno em explicação, quer estes sejam *simples* (18% no momento T2 vs 1% no momento T1) ou *complexos* (4% no momento T2 vs 2% no momento T1).

### *Relação entre os desenhos e as explicações dos alunos, antes e após a intervenção*

O nível de força explicativa das explicações dos alunos foi significativa e positivamente correlacionado com os três elementos considerados para os desenhos (*estrutura*,



*movimento e interações*), embora estes se correlacionem de forma diferente para o momento T1 e T2. No momento T1, as explicações dos alunos foram fraca a moderadamente correlacionadas com todos os elementos dos desenhos (*estrutura*:  $p=.42$ ,  $p=.00$ ; *movimento*:  $p=.27$ ,  $p=.01$ ; e *interações*:  $p=.36$ ,  $p=.00$ ). Em contraste, no momento T2, as explicações dos alunos apresentavam uma correlação fraca com elemento *estrutura* ( $p=.21$ ,  $p=.01$ ), mas forte com o elemento *movimento* ( $p=.64$ ,  $p=.00$ ) e *interações* ( $p=.60$ ,  $p=.00$ ). Uma tabela com as correlações é apresentada no Artigo II (Anexo II). No momento T2, todos os alunos que alcançaram níveis explicativos mais elevados (*explicação simples* ou *complexa*) apresentaram desenhos representando a matéria como uma estrutura submicroscópica (*explicação simples*: 18/18 e *explicação complexa*: 4/4), e a maioria representou corpúsculos exibindo movimento intrínseco (*explicação simples*: 18/12 e *explicação complexa*: 4/4) e múltiplas interações (*explicação simples*: 18/10 e *explicação complexa*: 3/4). Em contraste, no momento T1, embora a maioria dos alunos que apresentou descrições macro e mistas também tivesse desenhado uma estrutura submicroscópica da matéria (*macro-descritivo*: 12/18; e *misto-descritivo*: 19/19), apenas uma pequena parte representou movimento (*macro-descritivo*: 0/18 (causado) e 0/18 (intrínseco); *misto-descritivo*: 1/19 (causado) e 2/19 (intrínseco)), sendo que a maioria destes alunos apenas representou uma interação (*macro-descritivo*: 0/18; *misto-descritivo*: 1/19). Exemplos da associação entre os elementos dos desenhos dos alunos e o nível explicativo das suas explicações são apresentados no Artigo II (Anexo II).

## **4.3 | Estudo III — Raciocínio mecanicista em prática: o papel do desenho**

### **4.3.1 | Racional do Estudo III**

No segundo estudo desta tese, examinou-se o progresso dos alunos, nos seus desenhos e explicações científicas, após envolvidos numa estratégia didática com base na criação de desenhos em múltiplos níveis escalares para apoiar a construção de explicações científicas. Os resultados mostraram que, após a aplicação da estratégia didática, significativamente mais alunos criaram desenhos mais completos (representando aspetos, tais como movimento e interações) e mais próximos dos modelos canónicos da química. Além disso, as explicações dos alunos progrediram significativamente de relatos descritivos para relatos mecanicistas, i.e., relatos que envolvem considerar as entidades ao nível submicroscópico e propor como estas interagem entre si. Adicionalmente, após a estratégia, a qualidade dos desenhos dos alunos e o nível explicativo das suas explicações encontravam-se mais fortemente associados.

Os resultados do Estudo II sugerem que através de intervenções cuidadosamente planificadas e com o apoio de ferramentas adequadas, os alunos podem progredir nas suas explicações. Neste caso, uma intervenção baseada na interação com os fenómenos em explicação e na criação de desenhos em múltiplos níveis escalares. Contudo, coloca-se a questão: Qual o papel do desenho na construção de explicações científicas? Mais especificamente, quais as funções permitidas pelo desenho que apoiam o raciocínio mecanicista dos alunos, necessário para a construção de "melhores" explicações científicas? Até à data, poucos foram os estudos que exploram os processos pelos quais é gerado o raciocínio mecanicista dos alunos a um nível micro (Kapon, 2017; Mathayas et al., 2019; Parnafes, 2012; Russ et al., 2008) e, do conhecimento da investigadora, nenhum se focou especificamente no papel do desenho neste processo.

Assim, um primeiro objetivo do Estudo III foi compreender como o raciocínio mecanicista dos alunos emerge e é concretizado na criação colaborativa de desenhos para explicar um fenómeno. Desta forma, no Estudo III, informado pelas teorias da cognição distribuída e incorporada (Barsalou, 2008; Osbeck & Nersessian, 2014), assumiu-se que na criação colaborativa de um desenho forma-se um sistema cognitivo que compreende: os alunos, o desenho que criam e as suas ações verbais e físicas incorporadas no desenho.

Neste complexo sistema, o raciocínio emerge de um processo dinâmico que se concretiza na interação destes vários elementos (Hutchins, 2014). Neste estudo, observou-se um par de alunos do 8.º ano a criar desenhos colaborativamente e a pensar com os mesmos enquanto tentavam explicar um fenómeno químico relacionado com as reações químicas. Através de uma micro-análise multimodal, examinou-se os elementos do raciocínio mecanicista dos alunos em relação à criação dos seus desenhos, e como as suas interações com o desenho foram usadas para apoiar a concretização de certos elementos do seu raciocínio. Ao analisar os elementos do raciocínio mecanicista dos alunos, recorreu-se a um referencial recente que identifica as heurísticas epistémicas essenciais do raciocínio mecanicista dos alunos [HEEMR] (Krist et al., 2019). A novidade deste referencial é que se foca nas estratégias práticas de raciocínio (heurísticas) que guiam os alunos quando envolvidos na construção de explicações, em vez dos elementos conceptuais da explicação. Desta forma, permite compreender o processo pelo qual é gerado o raciocínio mecanicista dos alunos quando envolvidos na explicação de um fenómeno.

Um segundo objetivo do Estudo III foi explorar as interações cognitivas e sociais que ocorrem em torno da criação conjunta de um desenho. Mais especificamente, procurou-se examinar como estas interações são estabelecidas e moldadas em torno da criação colaborativa de desenhos. Para examinar as interações cognitivas e sociais em torno do desenho, usou-se o conceito de *espaço-nós* de Krueger (2011), definido como o espaço que é estabelecido e moldado na dinâmica das interações entre os indivíduos que o constituem e ao manipularem e explorarem o espaço que partilham. Neste estudo, assumiu-se que a criação colaborativa de desenhos têm o potencial para formar um *espaço-nós*, que por sua vez possibilita gerar e concretizar determinadas formas de comunicação e raciocínio.

### **4.3.2 | Métodos**

#### *Contexto do estudo*

Em junho de 2017, foi realizado um *workshop* (em ambiente não-escolar) com o tema: compreender e explicar fenómenos acerca das reações químicas através da criação de desenhos. O *workshop* foi dinamizado pela autora do estudo, e duas investigadoras da área da educação. Este *workshop* destinado a alunos do ensino básico contou com seis participantes voluntários, três do sexo feminino e três do masculino (com idades entre os 14

e 15 anos). Os participantes trabalharam em pares durante as atividades do *workshop*. Os pares foram seleccionados por uma das investigadoras dinamizadoras do *workshop* com o objetivo de garantir a boa relação entre os seus membros e proporcionar um ambiente confortável de trabalho. O *workshop* teve a duração de três dias, compreendendo três sessões de 90 minutos cada. Este estudo foca-se na primeira dessas sessões. Nessa sessão, os três pares de participantes realizaram uma tarefa na qual foi explorado o fenómeno do uso de antiácidos para aliviar os sintomas de azia (i.e., a reação química entre pastilhas de carbonato de cálcio e de magnésio e uma solução de ácido clorídrico). A tarefa foi desenhada e implementada nos moldes conceptuais da estratégia didática apresentada no Estudo II, i.e., criação de desenhos em múltiplos níveis para explicar um fenómeno observado. No entanto, foram introduzidas algumas adaptações de forma a criar momentos ricos de interação que pudessem ser captados para posterior análise. Essas adaptações envolveram a criação de um primeiro ciclo de desenhos, antes da interação como o fenómeno em explicação, e de um momento de discussão dos desenhos criados, guiado pela autora do estudo. A sequência de atividades que envolveu a tarefa proposta é ilustrada na Figura 4. Uma descrição mais detalhada pode ser consultada no Artigo III (Anexo III).



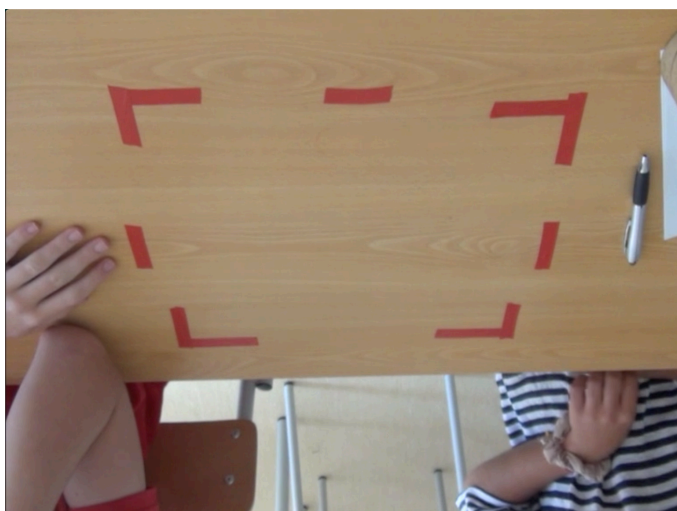
Figura 4. Sequência de atividades em que os alunos participantes estiveram envolvidos no Estudo III.

## *Participantes*

Este estudo foca-se na observação da interação de um dos grupos de participantes, Iris e Raul (pseudónimos). À data da intervenção, a Iris e o Raul, ambos com 14 anos, tinham acabado de concluir o 8.º ano de escolaridade com aproveitamento satisfatório. Os dois participantes estudavam em diferentes escolas, ambas seguindo o currículo nacional. Embora tivessem amigos em comum no *workshop*, os dois participantes não se conheciam até este momento. Este par destacou-se por ser o mais comunicativo e interativo. O Raul revelou ser um autêntico "pensador em voz alta", e o tempo das falas deste par dedicado ao assunto da tarefa em que estavam envolvidos foi superior ao dos outros grupos. Este aspeto fez da Iris e do Raul um par esclarecedor (Patton, 2002), podendo proporcionar um relato rico dos processos a ocorrer durante a interação entre os dois participantes, e entre os participantes e o meio material envolvente, nomeadamente o desenho.

## *Recolha de dados*

O método de análise utilizado foi a micro-análise multimodal (Bezemer & Jewitt, 2018; Jewitt et al., 2016; Norris, 2004). Conforme Morris refere, "uma análise multimodal requer dados multimodais" (2004, p.61). Com efeito, os dados deste estudo foram recolhidos através de registo vídeo digital. O registo em vídeo oferece a possibilidade de registrar áudio e imagem de forma temporal, sequencial e detalhada. Para além disso é durável, permite ser compartilhado e permite a análise multimodal (Cowan, 2014). Foi utilizada uma câmara de vídeo posicionada para captar a mesa de trabalho dos alunos e os seus gestos sobre a mesa. Decidiu-se focar a câmara nos gestos dos alunos, sem captar as suas caras, por uma questão de proteção da entidade dos participantes, e uma vez que esse registo não era necessário para a análise subsequente. De modo a assegurar que durante toda a interação a câmara estava realmente a focar o que era pretendido, foi traçado um retângulo na mesa (Figura 5) e pedido aos participantes para situar toda a sua atividade na área circunscrita por esse retângulo.



*Figura 5. Imagem da área de trabalho dos alunos na recolha de dados do Estudo III.*

### *Registo dos dados*

Os registos vídeos foram importados para o computador e seguidamente transferidos para o programa Final Cut Pro, anexando-se informação relativa ao dia, hora da captação, participantes envolvidos e uma breve descrição do conteúdo do vídeo. O Final Cut Pro é um programa de edição de vídeo que permite visionar os clips de vídeo numa *timeline*, sendo possível segmentar o clip e inserir etiquetas de cores para assinalar, codificar e descrever os diferentes segmentos selecionados. A Figura 6 mostra uma imagem da *timeline* de edição.

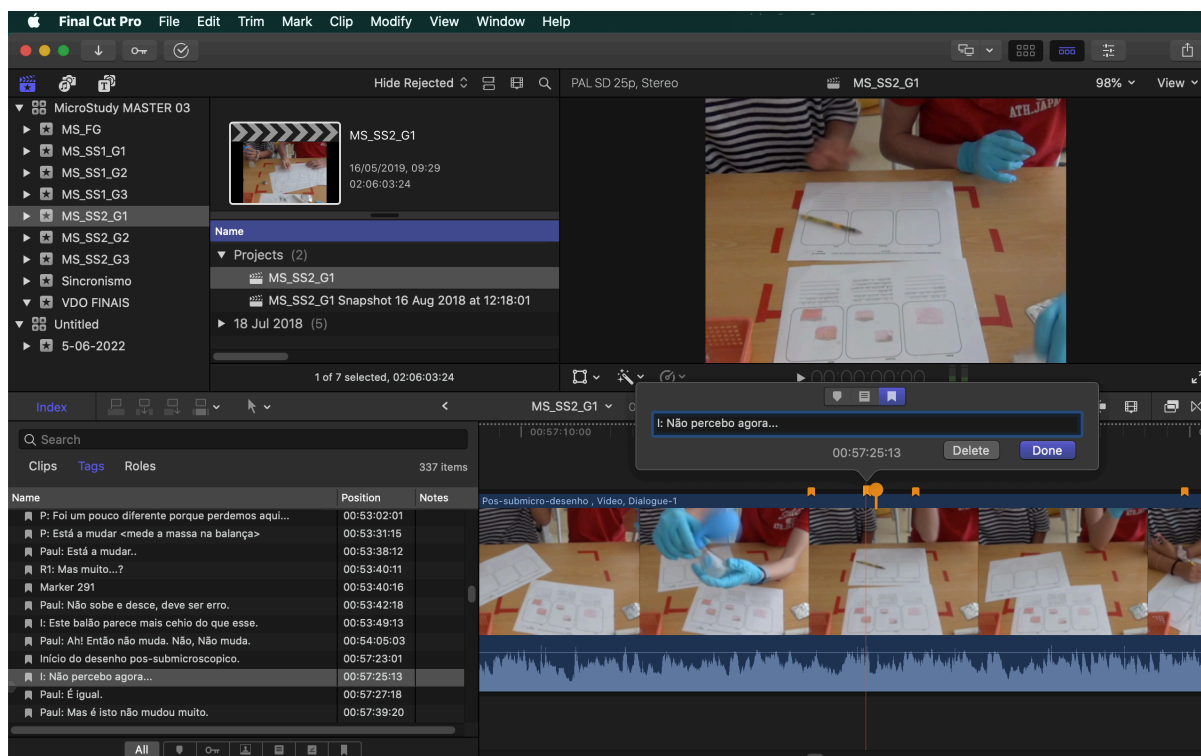


Figura 6. Imagem da timeline de edição.

## Seleção dos dados

O passo seguinte envolveu a seleção dos segmentos do clipe do vídeo da interação com interesse para os objetivos do estudo. Primeiro o clipe foi visionado na sua totalidade. Neste processo, foram identificados, etiquetados e descritos sumariamente vários segmentos no clipe, que basicamente corresponderam aos passos da sequência de atividade como ilustrada na Figura 4. Após este processo, foram selecionados para análise os segmentos do vídeo correspondentes à interação dos alunos enquanto criavam o primeiro e o segundo desenho ao nível submicroscópico, e a discussão consequente. Sendo o foco deste estudo os processos de raciocínio mecanicista dos alunos, selecionaram-se estes segmentos por providenciarem uma densa e rica descrição do raciocínio-em-ação dos alunos enquanto interagem com o desenho. À exceção destes momentos, a interação dos alunos situou-se na descrição e discussão dos eventos ao nível do fenómeno, e onde não foram captados quaisquer traços de um raciocínio mais profundo (i.e., ao nível dos mecanismos). Os segmentos vídeo selecionados para análise perfizeram 72 % do total da gravação.

## Análise de dados

O processo de micro-análise multimodal envolve a transcrição multimodal do curso da interação e do desenrolar dos seus eventos momento-a-momento (Norris, 2004). A transcrição multimodal é em si, um processo de análise que emprega simultaneamente modos visuais e escritos para representar os eventos em estudo. A transcrição e análise multimodal constituem um processo complexo e iterativo que compreende a transcrição para análise e a transcrição para explicar a análise, em que o último decorre naturalmente do primeiro. Deste modo, a transcrição para explicar a análise emerge das muitas transcrições prévias que constituem a análise de uma interação complexa (Norris, 2004). A transcrição multimodal, tal como qualquer outra forma de transcrição, tem sempre por base a perspectiva teórica do investigador (Norris, 2004).

Neste estudo, os elementos do sistema multimodal envolveram o desenho e as interações dos alunos entre si e com o desenho. Desta forma, os modos considerados para transcrição compreenderam a linguagem falada dos participantes—*o que dizem*—e as ações incorporadas no desenho—*o que fazem* (e.g., inscrições no papel, gestos, e olhares). Na transcrição e análise multimodal, o propósito não é ilustrar com imagens a transcrição do modo verbal, mas usar as imagens para analisar e descrever momento-a-momento o desdobramento dinâmico da interação (Baldry & Thibault, 2006). Seguindo esta perspetiva, os modos não-verbais (inscrições, gestos e olhares) desempenham um papel tão importante na análise quanto o modo verbal. O processo de transcrição e análise multimodal seguiu as seguintes fases informadas por Jewitt e colegas (2016) e Morris (2004):

Numa primeira fase, o segmento do vídeo selecionado para análise foi transcrito para o modo verbal—*o que dizem*—utilizando um conjunto de convenções adaptadas de Kapon (2017). Seguidamente, os modos não-verbais—*o que fazem*—foram representados graficamente na transcrição utilizando um conjunto de convenções adaptadas de Wardak (2017). Estas convenções são apresentadas em detalhe no Artigo IV (Anexo IV).

Numa segunda fase, foi realizada uma análise substantiva das ações incorporadas no desenho. Nesta fase, cada uma destas ações foi codificada e descrita numa outra coluna com base em Mathayas e colegas (2019), Parnafes (2010) e Wardak (2017). Ainda, numa outra coluna, foi adicionado um fotograma do vídeo correspondente ao modo de interação, e noutra coluna uma descrição dos eventos a acontecer no fotograma



apresentado. Sendo a imagem do fotograma estática, sempre que relevante para a análise, foram desenhadas setas no fotograma para ilustrar e destacar a ação em causa. A Figura 7 ilustra um excerto da transcrição multimodal realizada.

| Linha | Fala                                                                                                                                                                                                                        | Acções no desenho                                                                                                                                                                                               | Fotograma do vídeo                                                                 | Descrição do fotograma do vídeo                                                                                                                             |
|-------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1     |                                                                                                                                                                                                                             | <i>Olhar:</i> Iris e Raul olham para a folha do desenho vazia.                                                                                                                                                  |  | Raul e Iris estão sentados lado-a-lado com a folha do desenho à sua frente.                                                                                 |
| 2     | <b>Raul:</b> Bem, {temos de desenhar uma molécula <sup>[1]</sup> e depois outra molécula a vir e bater <sup>[2]</sup> e fazer coisas novas <sup>[3]</sup> } (4) e agora:::<br>(2)<br>[O que são? <sup>[4]</sup> Eu não sei. | <i>Gestos:</i> <sup>[1]</sup> aponta para a moldura <i>antes-da-reacção</i> ; <sup>[2]</sup> aponta para a moldura <i>durante-a-reacção</i> ; <sup>[3]</sup> e aponta para a moldura <i>depois-da-reacção</i> . |  | Raul e Iris estão sentados lado-a-lado com a folha do desenho à sua frente e Raul gesticula sobre a folha do desenho e Iris ouve e segue os gestos de Raul. |
| 3     | <b>Iris:</b> [O ácido eu sei, Eu sei o que é (.).                                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                    |                                                                                                                                                             |

Figura 7. Exemplo de um excerto da transcrição multimodal.

Numa terceira fase, foram examinados os elementos do raciocínio mecanicista dos alunos, com base no referencial de Krist e colegas (2019)—as heurísticas epistémicas essenciais para o raciocínio mecanicista [HEERM]. Com base neste referencial procurou-se identificar evidências do uso das quatro heurísticas do referencial de Krist e colegas (2019), nomeadamente:

*Heurística 1 (H1): Pensar em múltiplos níveis escalares*, i.e., considerar o que ocorre no nível escalar inferior ao nível do fenómeno. Os indicadores da presença desta heurística foram: os alunos consideraram algum elemento no nível escalar inferior ao do fenómeno quer seja concreto ou abstrato.

*Heurística 2 A (H2A): Identificar fatores*, i.e., identificar fatores relevantes no nível escalar inferior ao do fenómeno. Os indicadores para esta heurística foram: se os alunos identificaram algum dos seguintes fatores: entidades, quer sejam concretas (por exemplo, partículas) ou abstratas (por exemplo, as colisões); propriedades dessas entidades; ou regras ou processos associadas a essas entidades.

*Heurística 2B (H2B): Unpacking<sup>1</sup>*, i.e., caracterizar os comportamentos, interações e efeitos causados pelos fatores identificados. Os indicadores para esta heurística foram: se os alunos de alguma forma descreveram porque é que os fatores identificados são importantes, ou como é que estes atuam para produzir o fenómeno em explicação. Dependendo do fator identificado, os alunos fazem o *unpacking* do seguinte: comportamentos e interações entre entidades-chave do sistema, e/ou o efeito dessas interações nas propriedades dessas entidades.

*Heurística 3 (H3): Ligar*, i.e., coordenar como os fatores que foram identificados e *unpacked* dão origem ao fenómeno observado. Os indicadores para esta heurística foram: se os alunos estabeleceram ligações entre o fenómeno observado e os fatores identificados e *unpacked* no nível inferior ao do fenómeno, ou seja, se tentam explicar o comportamento do fenómeno com os seus mecanismos subjacentes.

A abordagem na análise das heurísticas para o raciocínio mecanicista envolveu os princípios de uma análise multimodal, ou seja, uma análise integradora em que o modo verbal não é privilegiado sobre os modos não-verbais (Baldry & Thibault, 2006). Desta forma, procurou-se evidências das heurísticas essenciais para raciocínio mecanicista nos múltiplos modos de comunicação e interação utilizados pelos alunos.

Por último, o processo de análise envolveu a identificação de episódios temáticos que permitissem dar respostas aos objetivos do estudo. Estes episódios foram posteriormente sujeitos a uma análise interpretativa mais profunda.

Primeiro: com o objetivo de compreender como o raciocínio mecanicista dos alunos emerge e é concretizado quando estes estão envolvidos na criação colaborativa de desenhos, foram identificados episódios sugerindo mudanças proeminentes ou rupturas ao nível do raciocínio mecanicista dos alunos (Parnafes & diSessa, 2013). Este processo envolveu um escrutínio ao longo da transcrição, considerando questões como: Que heurísticas os alunos estão a utilizar? Quais as ações incorporadas no desenho associadas ao uso dessas heurísticas? Como usam essas ações para elaborar nas heurísticas utilizadas? Que outros aspetos podem ter sido relevantes? Por vezes, ao longo deste processo, foi necessário voltar ao vídeo quando a descrição de certos momentos não era

---

<sup>1</sup> Optou-se pelo uso do termo em inglês ("unpacking"), por este termo conseguir representar de forma mais completa a ideia de dar sentido a algo, identificando os seus elementos e decifrando as suas múltiplas actividades, relações e interações.

suficientemente compreensiva, e nesse caso completou-se ou alterou-se a informação na transcrição. Desta análise emergiram seis temas, que no fundo constituíram etapas no processo de desenvolvimento e progressão na construção de uma explicação científica. Os episódios identificados foram: i) esboçar o esquema inicial de um mecanismo; ii) atribuir um significado compartilhado ao mecanismo inicial; iii) propor uma nova peça do mecanismo; iv) tentar progredir para um mecanismo mais completo; v) criar novos sentidos num novo ciclo de desenhos; e vi) integrar as várias peças num mecanismo final. Segundo: com o objetivo de explorar como se estabelecem e moldam as interações sócio-cognitivas em torno da criação conjunta de desenhos, foram identificados ao longo da transcrição novos episódios, sugerindo momentos críticos na interação sócio-cognitiva entre os alunos e destes com os desenhos. Este processo envolveu um novo ciclo de escrutínio ao longo da transcrição, desta vez considerando questões como: Como diferentes modos (fala e ações incorporadas no desenho) são usados para atingirem determinados propósitos (comunicar uma ideia, chegar a uma representação comum, pensar como algo funciona)? Como é que uma interação resulta da anterior e como molda a consequente? Desta análise emergiram três episódios temáticos, nomeadamente: i) estabelecer um *espaço-nós*; ii) Permitir o raciocínio(coletivo)-em-ação no *espaço-nós*; e iii) simplificar a comunicação no *espaço-nós*.

### 4.3.3 | Principais Resultados do Estudo III

Tendo em conta o tipo de análise realizada neste estudo, os seus resultados constituem uma narrativa densa dos eventos da interação momento-a-momento. Os resultados completos são apresentados nos Artigo III e IV (Anexos III e IV respetivamente). O Artigo III apresenta os resultados para o primeiro objetivo deste estudo, enquanto o Artigo IV apresenta os resultados para o segundo objetivo do estudo. Como tal, nesta subsecção, optou-se por apresentar uma síntese desses resultados no formato de Tabela. Os resultados são apresentados pela ordem dos objetivos do estudo: I) o raciocínio mecanicista dos alunos: como emerge e é concretizado na interação com o desenho colaborativo (Tabela 2); e II) as interações cognitivas e sociais em torno do desenho: como se estabelecem e se moldam (Tabela 3).

*I) Raciocínio mecanicista dos alunos: como emerge e é concretizado na interação com o desenho colaborativo*

A tabela seguinte sintetiza os resultados que permitiram dar resposta ao primeiro objetivo do Estudo III. Para cada episódio temático identificado na análise de dados são indicados os elementos do raciocínio mecanicista dos alunos e as respectivas funções do desenho para a sua geração e concretização.

Tabela 2 | Síntese de resultados relativos ao primeiro objetivo do Estudo III.  
(a versão completa dos resultados é apresentado no Artigo III no Anexo III)

|                                                                                                                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p><b>Episódio 1:</b> Construir o esboço inicial de um possível mecanismo.</p>                                         | <p><i>Elementos do raciocínio mecanicista:</i></p> <p>É criada uma versão simples de um mecanismo: "uma molécula" e "outra molécula" "colidem" e "fazem coisas novas".</p> <p>Considera o nível submicroscópico (H1); identifica entidades concretas (moléculas) e abstractas (colisões) (H2A); faz o <i>unpacking</i> de um efeito produzido pelas entidades identificadas "fazer coisas novas" (H2B).</p> <p><i>Funções do desenho:</i></p> <p>Direcionar para o raciocínio em múltiplos níveis —criar desenhos em múltiplos níveis produziu um ambiente fértil para começar a pensar nas entidades no nível inferior ao do fenómeno e como estas se comportam.</p> <p>Guiar e organizar o raciocínio—as ações incorporadas (como gestos) na folha do desenho (mesmo antes de iniciar a inscrição de elementos na folha) ajudaram a guiar e organizar uma linha de raciocínio que levou ao esboço de um primeiro esquema do mecanismo.</p> |
| <p><b>Episódio 2:</b> Novas propriedades são identificadas: um entendimento partilhado do esboço inicial é obtido.</p> | <p><i>Elementos do raciocínio mecanicista:</i></p> <p>Relaciona a diminuição da acidez no estômago com uma alteração que ocorre no nível inferior ao do fenómeno (H1).</p> <p>Identifica o tamanho como uma propriedade das entidades constituintes do ácido (H2A) e faz o <i>unpacking</i> de como um fator apresentado anteriormente (colisões) muda essa propriedade "as moléculas de ácido encolhem devido às colisões" (H2B).</p> <p>Atribui um novo sentido ao fator "fazer coisas novas", i.e., as "coisas novas" são consideradas como novas entidades químicas, ao contrário da mesma entidade química sofrendo uma mudança física ("fica menor") (H2A).</p>                                                                                                                                                                                                                                                                        |

*Funções do desenho:*

Gerar modelos—Levou a tomar decisões quanto à estrutura da entidade a representar e, desta forma, a gerar um modelo para a molécula de ácido que fica menor no decorrer da reação.

Animar modelos—Os alunos realizaram uma sequência de ações incorporadas no desenho. Um dos alunos encenou as entidades desenhadas a colidir, este gesto foi continuado pelo outro aluno que encenou o efeito dessas colisões na molécula de ácido. A sequência de ações incorporadas no desenho serviu para criar um modelo animado para uma parte do mecanismo que os dois alunos estavam a tentar descobrir.

---

**Episódio 3:** Novas peças do mecanismo são propostas e testadas.

*Elementos do raciocínio mecanicista:*

Pensar na composição das substâncias que se formam a partir das entidades que as constituem ao nível submicroscópico (H1).

Propor uma nova peça para o mecanismo, identificando as entidades específicas no sistema que têm um papel chave no processo de originar novas entidades químicas (i.e., as partes elementares nas entidades químicas) (H2A) e propor como estas atuam para formar novas entidades (reorganizam-se para originar novas entidades químicas) (H2B).

*Funções do desenho:*

Oferecer pontos de estabilidade para pensar—os alunos usaram gestos para apontar as entidades representadas no desenho e para encenar as suas possíveis relações. Os gestos incorporados no desenho acrescentaram assim uma camada dinâmica no desenho estático. O desenho e as ações incorporadas no desenho permitiram propor relações para as entidades do sistema, sem as ter de visualizar através da geração de uma representação visual-espacial interna.

---

**Episódio 4:** Tentando juntar as peças do mecanismo para progredir para um mecanismo mais completo.

*Elementos do raciocínio mecanicista:*

Respondendo a um estímulo exterior os alunos propuseram um novo fator (movimento) (H2A), que usaram para fazer o *unpacking* de como é que as entidades do sistema colidem e originam novas entidades (H2B).

---

---

**Episódio 5:** Um novo ciclo, novos entendimentos. Propõem-se e testam-se novos factores: uma nova peça no mecanismo.

*Elementos do raciocínio mecanicista:*

Após a observação do fenómeno, e a criação de uma segunda versão do desenho ao nível do fenómeno, um novo elemento foi identificado a "libertação de um gás". Na presença deste novo elemento os alunos questionaram-se sobre que entidades ao nível submicroscópico poderiam ter originado este gás" (H1).

Ao procurar como este gás foi originado ao nível submicroscópico uma nova peça do mecanismo foi proposta—o processo pelo qual as entidades do sistema se reorganizam para formar novas entidades. Desta forma, um novo fator foi identificado (as partes elementares das entidades do sistema separam-se) sendo então feito o seu *unpacking*: "e ligam-se de forma diferente" (H2B).

*Funções do desenho:*

Pensar em múltiplos níveis—comparar desenhos em diferentes níveis escalares permitiu trazer à atenção um novo elemento do fenómeno e considerar como esse elemento surge da interação das entidades ao nível submicroscópico.

Oferecer pontos de estabilidade para pensar—tal como em episódios anteriores, mais um vez, pensar nas relações entre as entidades do sistema tem lugar através de ações incorporadas no desenho (e.g., apontado para uma entidade representada e encenar as suas ações através de gestos).

---

**Episódio 6:** Integrar as várias peças num mecanismo final.

*Elementos do raciocínio mecanicista:*

As várias peças do mecanismo propostas ao longo destes episódios foram integradas num relato lógico e coerente, explicando como o fenómeno emerge dos vários fatores chave identificados e *unpacked* ao nível submicroscópico: "moléculas"(entidades chave) em "movimento constante" (propriedade das entidades chave) "colidem" (processo chave), e quando colidem (fator causal) as partes elementares dessas entidades "separam-se" um das outras e ligam-se de forma diferente (processo chave), originando-se assim novas substâncias (H3).

---

## *II) Interações cognitivas e sociais em torno do desenho: como são estabelecidas e se moldam*

A tabela seguinte sintetiza os resultados que permitiram responder ao segundo objetivo do Estudo III. Para cada episódio temático identificado na análise de dados são indicadas as funções do desenho.

Tabela 3 | Síntese de resultados relativos ao segundo objetivo do Estudo III.  
(a versão completa dos resultados é apresentado no Artigo IV no Anexo IV)

---

**Episódio 1:** Estabelecer um espaço-nós.

*Funções do desenho:*

O desenho forma um meio material no espaço partilhado pelos dois alunos, e que eles exploram através de ações incorporadas permitindo estabelecer um espaço de atenção conjunta e mútua-coordenação:

Os alunos gesticulam sobre a folha do desenho para gerir e manter a atenção mútua.

Os alunos usam o espaço material do desenho (e.g. através de inscrições no papel) para transformar uma representação individual/intencional, numa representação material e portanto externa que apresenta aspetos visuais e espaciais relevantes. A representação individual, materializada no papel, é então alvo de escrutínio por parte dos dois alunos para criar uma representação comum que inclui aspetos das suas representações individuais negociadas no espaço do desenho.

---

**Episódio 2:** Permitir o raciocínio(coletivo)-em-ação no espaço-nós.

*Funções do desenho:*

Percepção visual directa—através de ações incorporadas no desenho (frequentemente por gestos ou inscrições) os alunos encenaram representações, permitindo uma percepção visual direta das mesmas e que ajudaram a compreender e elaborar as ideias um do outro.

Ações coordenadas—por vezes, os alunos coordenaram as suas ações incorporadas no desenho (e.g., gesticulando sequencialmente no desenho) para gerar uma representação visual momentânea que ajudou a explorar as representações um do outro e promover uma compreensão mútua.

---

**Episódio 3:** Simplificar a conversação no espaço-nós.

*Funções do desenho:*

Coordenar gestos e fala—a conversa entre os dois alunos desenvolveu-se apontando ativamente no desenho. Frequentemente, a sua conversa incluiu elementos deícticos (e.g., este, aquele) coordenados com um gesto de apontar para a entidade no desenho a que faz referência.

Em muitos momentos a conversa dos alunos, para um observador exterior, pareceu fragmentada e difícil de seguir, mostrando que os dois alunos criaram o seu espaço-nós, que é genuinamente o seu espaço de interação, e onde eles mantêm uma conversa fluida.

---

Seguidamente são discutidos os resultados dos três estudos empíricos relativamente a cada uma das questões de investigação da presente tese.

### 5.1 | Q11: Qual a natureza das explicações científicas que alunos do 8.º ano constroem?

*a | Um sistema de análise para caraterizar as explicações científicas dos alunos*

Nesta tese começou-se por se propor um sistema de análise para caraterizar de forma prática e sistemática as explicações científicas que os alunos constroem. O sistema proposto, permite caraterizar as explicações dos alunos em seis níveis de força explicativa, que vão desde a simples descrição dos eventos num fenómeno (menor força explicativa) ao relato de como e porquê estes ocorrem através dos seus mecanismos subjacentes (maior força explicativa). Ao aplicar o sistema a exemplos de explicações de alunos do 8.º ano, os seus níveis de força explicativa permitiram diferenciar a complexidade das explicações dos alunos e situá-las num referencial de progressão. Com efeito, ao atribuir uma determinada explicação a um determinado nível é possível perceber o quão a sua estrutura se aproxima (ou afasta) de uma "boa" explicação científica, bem como o que lhe falta para atingir um nível superior. Adicionalmente, ao aplicar o sistema a exemplos de explicações, antes e após a implementação de uma estratégia didática, foi possível traçar o progresso que os alunos fizeram nas suas explicações.

Desde da sua publicação, este sistema de análise tem sido aplicado por outros autores em diferentes contextos e na explicação de diferentes fenómenos. Por exemplo, Mclure e colegas (2021) adaptaram-no para caraterizar os diagramas explicativos de 17 alunos do 5.º e 6.º ano (10-12 anos), ao longo de seis aulas de química, onde explicaram fenómenos relacionados com a teoria corpuscular da matéria, nomeadamente, os estados físicos da matéria, calor latente de vaporização, pressão de um gás, variação de volume com a temperatura e dissolução a diferentes temperaturas. Os autores referem que o benefício mais evidente do sistema é facilitar a categorização consistente dos diagramas explicativos dos alunos de acordo com um referencial teórico que descreve as dimensões



essenciais de uma "boa" explicação científica. Salientam que este permite ainda obter ampla informação sobre a compreensão conceptual dos alunos e estruturas de raciocínio acerca dos fenómenos em estudo. Num outro estudo, McClure (2022) utilizou o sistema na sua versão original para comparar as explicações escritas dos alunos acerca da evolução do modelo atómico. Este seu estudo longitudinal com alunos do 9.º ano (15 anos) teve como objetivo mostrar a eficácia de uma estratégia de ensino multi-dimensional para apoiar a construção de explicações, baseada na geração de multi-representações, questionamento e discussão em pequenos grupos. Os resultados do estudo corroboraram a produtividade do sistema para mostrar como os alunos progridem nas suas explicações através de níveis explicativos críticos. Assim, a ampliação do corpus de dados analisados veio contribuir para a validade externa do sistema de análise proposto no Estudo I desta tese.

### *b | As explicações científicas que alunos do 8.º ano constroem*

Ao aplicar o sistema de análise a exemplos de explicações de alunos do 8.º ano, verificou-se que a maior parte das explicações se situou no nível descritivo. Nestas explicações, os alunos ou não consideram o nível escalar inferior ao do fenómeno (nível submicroscópico), ou, considerando-o, atribuem-lhe propriedades do nível macroscópico. Em suma, estes relatos superficiais—sem força explicativa—falham no estabelecimento de uma relação de emergência entre o nível do fenómeno e o nível dos mecanismos. Outros autores (Rappoport & Ashkenazi, 2008; Stains & Sevan, 2015; Samon & Levy, 2017; Talanquer, 2015; Tümay, 2016) têm identificado semelhantes formas de raciocinar acerca dos fenómenos da química; acreditando-se estarem associadas a formas intuitivas de pensamento, tais como i) conceber as substâncias químicas como agregados ou misturas de diversos elementos e/ou ii) conceber os elementos de um sistema como gozando das mesmas propriedades para os diferentes níveis escalares, i.e., macroscópico e submicroscópico (Talanquer, 2018b).

Os resultados mostram ainda um conjunto de explicações que são meras afirmações de leis ou regras que os alunos aprendem na sala de aula de química—como a ideia de que com a temperatura as partículas ficam mais agitadas—sem, contudo, as utilizarem para dar sentido ao que está acontecendo e tentar propor possíveis mecanismos. Afirmações deste género são frequentemente ouvidas e consideradas como explicações aceitáveis na sala de aula de ciências (Braaten & Windschitl, 2011; Krist et al. 2019; Mc Lure, 2021). Estes resultados reforçam os argumentos de que frequentemente os alunos aprendem um

conjunto de factos sem, no entanto, serem encorajados a usá-los para elaborar raciocínios mais complexos, limitando assim a sua capacidade de desenvolver uma compreensão mais profunda acerca dos fenómenos naturais (Driver et al., 1996; McCain, 2015; Strevens, 2013).

Adicionalmente, um número muito reduzido de alunos propôs um possível mecanismo para os fenómenos em explicação. Este resultados são consistentes com os argumentos de que apesar da sua capacidade intuitiva para estabelecer relações de causalidade para eventos do quotidiano (Brewer et al., 1998; diSessa, 1993), quando confrontados com fenómenos mais complexos, como os relacionados com a natureza corpuscular da matéria, os alunos tendem a apresentar relatos que não incluem a componente mecanicista, ou incluem, mas de forma incompleta e fragmentada (Bolger et al., 2012; Grotzer, 2003).

Por último, os resultados revelaram que para os diferentes fenómenos em explicação (i.e., dissolução do açúcar em água, condensação do ar numa superfície fria, expansão térmica de um gás), as explicações dos alunos apresentaram diferentes níveis explicativos. Estes são resultados particularmente interessantes, sugerindo que os alunos tendem a desenvolver uma compreensão restrita e localizada dos fenómenos. Com efeito, estes resultados vêm juntar-se a outros estudos empíricos (e.g., Cooper & Stowe, 2018; Talanquer, 2018b; Tümay, 2016) que consistentemente têm reportado que os alunos apesar de aprenderem a enunciar os princípios da teoria corpuscular da matéria com alguma facilidade, não os usam como uma teoria unificadora para dar sentido e explicar fenómenos relacionados.

Estes resultados mostraram que os alunos utilizaram de forma arbitrária na explicação dos três fenómenos fatores como: a matéria ser constituída por pequeníssimas partículas—designadas por corpúsculos—, com movimento incessante e espaços vazios entre si, sendo que o movimento desses corpúsculos está relacionado com a temperatura. Por exemplo, mais alunos consideram que o ar é constituído por corpúsculos na situação da expansão térmica de um gás, do que na condensação do ar numa superfície fria. Também, na dissolução do açúcar, uma menor percentagem de alunos considerou que cada substância (água e açúcar) é constituída por corpúsculos em incessante movimento e com espaços vazios entre si. Algumas razões para estas diferenças são discutidas no Artigo II (Anexo II); aqui importa salientar que estes resultados juntam-se a um importante corpo de investigação empírica (e.g., Margel et al., 2008; Papageorgiou, 2013; Tümay, 2016),

dando força aos argumentos de que os alunos tendem a desenvolver uma compreensão dos fenómenos restrita e localizada, não aplicando as ideias-chave da ciência como um enquadramento teórico unificado que permite dar sentido e explicar vários fenómenos relacionados.

## **5.2 | QI2: Que desenhos criam os alunos e que explicações constroem após envolvidos numa estratégia didática baseada na criação e uso de desenhos?**

### *a | O progresso nos desenhos e explicações científicas dos alunos após a estratégia didática*

No estudo II examinou-se o progresso dos desenhos e explicações dos alunos após a implementação de uma estratégia didática baseada na criação e uso de desenhos em múltiplos níveis para apoiar a construção de explicações científicas. Os resultados mostraram progressos significativos, tanto nos desenhos como nas explicações dos alunos.

Após a estratégia didática, os desenhos dos alunos não só se aproximaram mais dos modelos canónicos da natureza corpuscular da matéria (representado a matéria como entidades discretas com movimento intrínseco), como representavam modelos mais completos—mostrando as múltiplas interações causando o fenómeno em explicação. Estes resultados são importantes de duas formas. Por um lado, porque vários estudos têm mostrado que os desenhos dos alunos em química tendem a representar aspetos estáticos estruturais (composição e posição), mas menos aspetos dinâmicos, como movimento e interações (Ardac & Akaygun, 2005; Becker et al., 2016; Ryan & Stieff, 2019). A melhoria significativa dos desenhos dos alunos, sobretudo na representação dos elementos movimento e interações, sugere os benefícios desta estratégia no desenvolvimento de competências de representação visual (ou seja, o que representar e como representar) (diSessa, 2004). Por outro lado, alguns estudos sugerem que a tendência dos alunos em representar determinados aspectos de um fenómeno, e não outros, está associada à natureza e contexto da tarefa que lhes é proposta. Muitas vezes, os alunos dão respostas e direcionam os seus processos cognitivos tendo em conta a forma como percebem o que lhes está a ser pedido (i.e., que resposta é suposto darem naquela situação). De acordo com Kapon (2017), os alunos tendem a perceber (ou enquadrar) uma tarefa das seguintes formas: “dar a resposta correta”; ou procurar “dar sentido a algo”, e assim alinhar as suas

estratégias na procura de uma respostas. Ryan e Stieff (2019) associam o facto dos alunos não representarem aspetos, tais como, interações nos seus desenhos, com o facto de não percecionarem os seus desenhos como modelos de um mecanismo que podem usar para pensar como este funciona. Assim, os resultados do Estudo II, ao revelarem que os desenhos dos alunos não só progrediram para representações mais próximas de modelos canónicos, mas também para representações mais completas—incluindo múltiplas interações entres as entidades envolvidas—,sugerem que os alunos não só desenvolveram competências de representação visual, mas também competências ligadas ao valor epistémico do desenho para inferir e propor fatores, testar ideais e apoiar na geração de explicações. Tal reconhecimento tem paralelos no trabalho de outros autores (e.g., diSessa, 2004; Fortus, Shwartz, & Rosenfeld, 2016; Schwarz et al., 2009), onde este desenvolvimento é entendido como um processo metacognitivo crítico acerca da prática de criar e usar modelos ou representações visuais em ciência para explicar fenómenos naturais.

Tal como os desenhos, também as explicações dos alunos progrediram significativamente. Após a implementação da estratégia, mais alunos construíram explicações considerando múltiplos níveis escalares (versus um só nível, o nível macroscópico); mais alunos revelaram distinguir o comportamento do fenómeno ao nível macroscópico das interações das entidades ao nível submicroscópico (versus usar as propriedades do nível macroscópico para interpretar as propriedades das entidades do nível submicroscópico); e mais alunos propuseram múltiplos fatores a ocorrer simultaneamente (versus um único fator como causa de um efeito). Em suma, uma estratégia baseada na criação de desenhos, com genuínas oportunidades para pensar através de múltiplos níveis escalares, parece ter sido efetivada para levar os alunos a raciocinar de forma mecanicista, menos intuitivas e mais próximas das formas de pensar valorizadas em química.

### *b | A associação entre os desenhos e as explicações dos alunos, antes e após a estratégia didática*

Quando após a estratégia se examinou a associação entre os desenhos e as explicações dos alunos, observou-se que elementos como movimento e interações—considerados críticos para propor mecanismos—se encontravam significativamente mais associados a explicações com maior força explicativa, do que antes.

Antes da estratégia, apesar da maioria dos alunos criar desenhos consistentes com a ideia de que a matéria é constituída por entidades discretas (corpúsculos), as suas explicações não integravam esta visão submicroscópica da matéria. De facto, muitos alunos que criaram desenhos com estruturas submicroscópicas apresentaram explicações que eram meras descrições dos eventos ao nível macroscópico. Este é um aspeto que levanta questões importantes quanto à possibilidade dos alunos estarem simplesmente a mimetizar representações com que tinham tomado contacto anteriormente. Por exemplo, antes da estratégia, um desenho típico mostrava corpúsculos estáticos de açúcar dispersos por corpúsculos estáticos de água (ou num fundo contínuo de água). Representações visuais deste género são frequentes nos manuais escolares. Estes resultados sugerem a possibilidade uma vez mais que, antes da estratégia, os alunos criam desenhos sem de facto os compreenderem como modelos ou representações onde é possível simular os mecanismos dos fenómenos que estão a tentar explicar. Por exemplo, alguns estudos, onde representações visuais dinâmicas (animações) foram utilizadas em combinação com a criação de desenhos, mostram que os alunos criam frequentemente desenhos reproduzindo as representações visuais observadas na animação; no entanto, não os usam para explicar um fenómeno relacionado (e.g., Cooper et al., 2017; Kelly & Jones, 2008). Estes resultados parecem consistentes com o argumento de Cooper e outros (2017) de que criar desenhos é importante, pode, no entanto, não ser o suficiente para levar por si só a uma compreensão mais profunda dos conceitos envolvidos.

Contudo, após a estratégia, desenhos e explicações encontravam-se significativamente mais associados, sobretudo para os elementos movimento e interações. Mais alunos criaram desenhos representando substâncias químicas como uma coleção dinâmica de corpúsculos em interação, com propriedades que emergem de tais interações; e esses alunos apresentam explicações consistentes com os seus desenhos, i.e., num nível explicativo superior onde descrevem as várias interações a ocorrer e as ligam ao fenómeno em causa. Este aspeto é relevante. Primeiro porque sugere que os alunos criaram desenhos que refletem mais as suas próprias ideias e compreensão (ou seja, produtos do seu próprio pensamento); segundo porque sugere que os alunos estavam mais propensos a usar os seus desenhos para dar sentido ao que está a acontecer e para propor possíveis mecanismos; e, portanto, mais capazes de construir uma explicação num nível explicativo superior. Tais resultados permitem argumentar que a estratégia implementada, baseada na

criação de desenhos com o propósito de apoiar a construção de "melhores" explicações, parece ter sido determinante para tais melhorias.

Conforme mencionado na secção do enquadramento teórico, vários autores têm argumentado que os benefícios do desenho para aprender em ciência não podem ser assumidos sem precaução (Ainsworth et al., 2011; Cooper et al., 2017). Estes autores salientam que, tal como outras ferramentas, o desenho, por si só, pode não trazer os desejados benefícios para a aprendizagem dos alunos. Com efeito, o potencial do desenho depende de como este é integrado numa determinada tarefa, e com que propósito e através de que processos os alunos criam desenhos. No Estudo II foi implementada uma sequência didática onde os alunos foram levados a criar desenhos ao nível macroscópico para ilustrar as suas observações, e desenhos ao nível submicroscópico para representar o que existe a esse nível que possa ter causado o fenómeno observado. Por fim, foi pedido aos alunos que usassem os seus desenhos para construírem uma explicação. Este passo requer coordenar as interações das entidades ao nível submicroscópico e ligá-las com o fenómeno emergente. Ao fazê-lo, os alunos são levados a encontrar possíveis inconsistências ou lacunas em como as interações representadas no desenho submicroscópico dão origem aos eventos no desenho macroscópico. Se tais lacunas ou inconsistências se verificarem, os alunos são então conduzidos através de um novo ciclo de revisão e exploração dos seus desenhos, onde de forma mais focada podem identificar novas entidades e interações. Acredita-se que parte do potencial do desenho para apoiar a construção de explicações em química, emerge deste complexo processo iterativo. De facto, foi um processo semelhante a este que se observou quando no Estudo III se analisou ao nível micro a interação de dois alunos a construírem desenhos colaborativamente para explicarem um fenómeno. Em seguida, respondendo à questão do Estudo III, irão dar-se a conhecer alguns dos mecanismos subjacentes a este processo.

### **5.3 | QI3: Como a criação e uso de desenhos apoia o raciocínio mecanicista dos alunos necessário à construção de "melhores" explicações científicas?**

*a | O raciocínio mecanicista dos alunos: como é gerado na criação colaborativa de desenhos*

No caso apresentado no Estudo III, observou-se um par de alunos a criar desenhos colaborativamente para explicar uma reação química em estudo. Uma micro-análise multimodal desta interação permitiu compreender o processo de descoberta do mecanismo subjacente a um fenômeno, em que os dois alunos se envolveram enquanto criavam desenhos em conjunto. Este processo iniciou-se com os alunos a delinearem um esquema inicial, ou uma versão simplificada do mecanismo, que foi sendo completado peça a peça à medida que foram avançando na criação dos seus desenhos. No final, os dois alunos, ligando as várias peças do mecanismo que foram sendo propostas, apresentam uma explicação completa (tendo em conta o seu nível de escolaridade) para como e porquê o fenômeno em estudo ocorreu. O processo aqui observado para os dois alunos encontra semelhanças no que Machamer e colegas (2000) descrevem relativamente à prática de cientistas na explicação de um novo fenômeno através da descoberta dos seus mecanismos subjacentes.

Adicionalmente, ao aplicar o referencial proposto por Krist e colegas (2019)—as heurísticas epistémicas essenciais ao raciocínio mecanicista [HEEMR]—para analisar a interação dos dois alunos, foi possível identificar e caracterizar a um nível micro o seu processo de raciocínio. Os resultados mostram evidências do uso destas heurísticas epistémicas como uma forma produtiva de pensar acerca dos mecanismos subjacentes a um fenômeno. A análise da interação mostrou os dois alunos a pensarem no nível inferior ao do fenômeno para identificarem entidades chave a esse nível e suas propriedades, bem como propondo possíveis interações e relações e como esta funcionam no mecanismo (*unpacking*) e, por fim, a tentarem ligar os vários fatores num mecanismo lógico e coerente que explica como e porquê o fenômeno em causa ocorre. A análise revelou que os dois alunos usaram estas heurísticas de forma flexível e iterativa em ciclos de exploração, avaliação e revisão à medida que em conjunto criaram o seu desenho. Note-se que estas heurísticas não foram de qualquer forma ensinadas aos dois alunos. Com efeito, a forma como as usaram espelha de certa forma o que Krist e colegas (2019) sugerem relativamente ao seu uso, i.e., como uma forma de discurso interiorizado que os alunos usam na prática quando envolvidos na descoberta de um mecanismo para explicar um fenômeno. Estes resultados, vêm contribuir para relevantes discussões atuais acerca do processo de desenvolvimento do raciocínio mecanicista dos alunos.

A primeira é que, aprender a raciocinar de forma mecanicista, tal como Krist e colegas (2019) referem, é mais do que aprender um procedimento. É aprender uma forma de pensar sobre como "algo funciona" e que envolve colocar questões e encontrar respostas para essas questões. De facto, a interação destes dois alunos constituiu uma valiosa evidência desta forma de pensar.

A segunda é que, a intuição mecanicista, que se acredita que os alunos desenvolvem desde cedo (Brewer et al. 1998), pode ser usada como uma forma de orientar o raciocínio dos alunos em direções produtivas. Com efeito, o caso aqui analisado junta-se a outros estudos (e.g., Kapon, 2017; Mathayas et al., 2019; Russ et al., 2008; van Mil et al., 2016) para afirmar que quando são criadas genuínas oportunidades para os alunos se envolverem na descoberta de mecanismos para um fenómeno em estudo, em que estes se envolvem num processo de considerar o que está no nível inferior ao do fenómeno, atribuir propriedades às entidades nesse nível, e testar como funcionam no mecanismo que produz o fenómeno; i.e., os alunos progridem na construção de uma explicação através do raciocínio mecanicista.

A terceira é que envolver os alunos na construção de explicações para fenómenos cujos conceitos envolvidos ainda não estão claros, constitui uma forma produtiva de apoiar e facilitar o desenvolvimento desses conceitos. No caso apresentado no Estudo III os dois alunos utilizaram as suas ideias intuitivas para proporem propriedades para entidades ao nível submicroscópico, as quais então usaram para fazer o *unpacking* de um processo no mecanismo que estavam a tentar construir. Segundo Krist e colegas (2019), identificar o uso das heurísticas epistémicas em exemplos onde os alunos usam conhecimento não canónico, constitui uma evidência dos seus esforços epistémicos para compreenderem e explicarem um fenómeno. Estes são resultados importantes que sustentam a ideia do raciocinar mecanicista como uma forma útil e produtiva para envolver os alunos na construção das suas explicações, mesmo quando o seu conhecimento ainda é limitado (Kapon, 2017; Manz, 2012; Russ et al., 2008). De facto, neste exemplo foi possível observar um progresso de uma compreensão intuitiva de um mecanismo de uma reação química para uma compreensão sofisticada, mais próxima de uma explicação canónica.

A micro-análise multimodal deste caso, onde dois alunos criaram desenhos de forma colaborativa, revelou que o raciocínio mecanicista destes dois alunos ocorreu embebido num complexo espaço interacional criado pelos próprios, e do qual fazem parte



as suas representações internas (representações ou modelos mentais), os seus desenhos e suas ações individuais e coletivas incorporadas no desenhos. Dentro desse complexo espaço interacional, os desenhos desempenharam um papel fundamental que moldou importantes processos de interação cognitiva e social. Em seguida passa-se a discutir o papel que o desenho desempenhou nesta complexa interação, primeiro ao nível cognitivo e depois ao nível social.

## **b | Interações cognitivas e sociais permitidas pelo desenho**

Ao nível das *interações cognitivas*, o desenho desempenhou dois papéis únicos para apoiar o raciocínio mecanicista dos alunos, especificamente i) levar os alunos a procurarem um mecanismo; e ii) possibilitar o raciocínio-em-ação.

i) *Levar os alunos a procurar um mecanismo*—Neste caso, a criação de desenhos em múltiplos níveis, e particularmente ao nível submicroscópico, provou ser uma forma produtiva para inspirar os alunos a começarem a questionar "como as coisas funcionam" no nível inferior ao do fenómeno, levando-os em busca de algo mais profundo no fenómeno em causa, ou seja, a raciocinar acerca dos mecanismo subjacentes que o produzem (Krist et al., 2019). Segundo Krist e colegas (2019), este passo reflete uma importante decisão epistémica que é reconhecer que esta forma de raciocínio pode ser útil para descobrir o que causa o fenómeno em estudo. Criar um desenho exige um foco nos vários aspectos dos elementos a desenhar (Kirsh, 2011; Tversky, 2011). Especificamente, aspectos relacionados com as propriedades estruturais (e.g., tamanho, forma e cor das entidades a representar e a sua posição relativa no espaço e em relação umas às outras) e comportamentais (como movimento e ações em que possam estar envolvidas essas entidades) (Bobek & Tversky, 2016; Kirsh, 2011). Neste caso, criar desenhos ao nível submicroscópico levou os alunos a considerar o que está no nível inferior ao do fenómeno a questionar: como são as suas entidades, como é a sua estrutura e como se comportam? Posto de outra forma, inspirou-os a iniciar um processo de descoberta de um mecanismo. Alguns autores (Southard et al., 2017; van Mil, Boerwinkel, & Waarlo, 2013) sugerem este tipo de questões como pontos de partida produtivos para a descoberta de mecanismos, refletindo o género de práticas com as quais os cientistas se envolvem na explicação de novos fenómenos. Em suma, com base neste caso a criação de desenhos em múltiplos níveis pareceu providenciar uma "porta-de-entrada" para o raciocínio mecanicista,

direcionando os alunos para começarem a questionar o que está para lá do fenômeno observável que o pode causar.

ii) *Raciocínio-em-ação*—A análise deste caso revelou vários exemplos onde criar um desenho e interagir com esse desenho (mesmo apenas só no ato de o observar atentamente) funcionou para distribuir parte do processo de raciocínio dos alunos (Hutchins, 2006; Krueger, 2012). Um desenho fornece informações visuais e espaciais sobre as entidades de interesse aí representadas que de outra forma teriam de ser visualizadas através da construção de uma representação visual-espacial mental (interna) (Bobek & Tversky, 2016; Stieff & Raje, 2010). A criação interna destas representações é uma operação cognitiva "pesada" (Krueger, 2012; Tversky & Suwa, 2009). O desenho ao permite transferir essas representações internas para um meio material onde podem ser acedidas visualmente e usadas para pensar sem que necessariamente tenham de ser internalizadas, permite poupar recursos cognitivos que podem ser eventualmente utilizados em outras operações (Zhang, 1997). Neste caso foram evidenciados momentos em que, perante uma incerteza ou dúvida, os alunos tornaram ao desenho, observando-o cuidadosamente por alguns segundos, vindo então a identificar novas entidades e propriedades que então usaram para fazer o unpacking de um possível processo para como estas atuam no mecanismo. Estes momentos podem ser interpretados como um ato de raciocínio distribuído através das representações internas (na mente do aluno) e externas (no desenho) (Hutchins, 2006; Osbeck & Nersessian, 2006). Em suma, o papel dos desenhos no raciocínio dos alunos não se limitou à simples expressão ou transmissão de pensamentos previamente desenvolvidos intra-mentalmente, mas permitiu formas de raciocínio distribuído concretizadas na interação aluno-desenho.

Adicionalmente, a análise deste caso revelou inúmeros exemplos dos alunos gesticulando espontaneamente e apontando nos seus desenhos enquanto desenvolviam uma linha de raciocínio acerca de como as entidades aí representadas interagem e se relacionavam. Em vários momentos, gesticular sobre os desenhos permitiu animar as entidades estáticas aí representadas e modelar as suas interações. Nestes exemplos, ambos os desenhos (representação estática) e os gestos (representações dinâmicas) serviram para criar modelos animados virtuais que permitiram simular em tempo real uma sequência de interações num processo. Estes momentos constituíram genuínos processos de raciocínio(coletivo)-em-ação que permitiram elaborar na complexidade dessas interações. A

literatura em raciocínio mecanicista sugere a simulação de modelos animados como uma forma produtiva de raciocinar sobre os processos a acontecer num mecanismo. Os cientistas fazem-no frequentemente na sua prática (Bechtel & Abrahamsen, 2005; Nersessian, 2008); e alguns estudos empíricos (e.g., Bolger et al., 2012; Mathayas et al., 2019; Russ et al., 2008) têm revelado o seu potencial para guiar o raciocínio dos alunos quando envolvidos na descoberta de mecanismos para um novo fenómeno. No entanto, para os cientistas, com elevada experiência e conhecimento num determinado domínio, é possível, pelo menos para mecanismos mais simples, operar estas simulações mentalmente (Bechtel & Abrahamsen, 2005). Contrariamente para os alunos, mesmo a simulação de mecanismos simples é uma operação complexa para realizar apenas mentalmente (Bobek & Tversky, 2014; Mathayas et al., 2019). Com base neste caso, o desenho tem aqui um papel único ao providenciar um meio material com o qual é possível interagir para simular modelos animados dos processo num mecanismo.

Ao nível das *interações sociais* identificaram-se duas formas em que o papel do desenho se revelou único, especificamente i) para estabelecer e moldar um espaço de ação compartilhado (*espaço-nós*) e ii) para simplificar o processo de conversação na colaboração.

i) *Estabelecer e moldar um espaço-nós*—A análise deste caso sugere que a atividade de criar um desenho colaborativamente teve um papel relevante no estabelecimento de um espaço genuíno de ação compartilhada, um *espaço-nós*. O termo *espaço-nós*, adaptado de Krueger (2011), representa o espaço social que é estabelecido e sustentado num complexo processo interativo de cooperação mútua e atenção conjunta. Ocorre quando dois ou mais indivíduos, interagindo, são mutuamente responsivos, fazendo os ajustes necessários para alcançar um entendimento partilhado das suas representações e intenções individuais. O resultado, ao estabelecer-se um *espaço-nós*, é o surgimento de novas representações, antes indisponíveis para as partes individuais, mas que emergem como uma realização compartilhada. Ou seja, poder-se-á afirmar que uma genuína colaboração tenderá a falhar se o estabelecimento do *espaço-nós* falhar (Krueger, 2011; Sfard & Kieran, 2001).

Conforme anteriormente salientado, criar um desenho requer tomar decisões acerca do que representar e como representar (Kirsh, 2011; Twersky & Suwa, 2009). Quando duas ou mais pessoas se juntam para criar um desenho trazem as suas representações e

intenções individuais, que frequentemente (como no caso aqui apresentado) não coincidem (Healey, 2006). A análise deste caso revelou, assim, que a criação de um desenho colaborativo exigiu aos dois alunos um entendimento das representações e intenções individuais de cada um, bem como a cooperação e atenção conjunta para desenvolverem representações compartilhadas a partir das suas representações individuais. Relevante neste processo foi o papel do desenho, em si próprio, para promover essa cooperação mútua. Foi possível observar os dois alunos a explorar o espaço do desenho por meio de ações incorporadas, como gestos e inscrições no papel, que serviram para encenarem as suas representações individuais (privadas) e, assim, torná-las perceptualmente disponíveis (públicas). O espaço do desenho permitiu certas ações incorporadas que então funcionaram para orientar a atenção dos alunos para as representações e intenções um do outro e, assim, moverem a interação do espaço privado para o espaço coletivo. O que quer dizer que o desenho constituiu um meio material acessível aos dois alunos, utilizado através de ações incorporadas para encenar as suas representações individuais, o que funcionou para estabelecer um espaço de atenção conjunta e coordenação mútua. Por outras palavras, um espaço-nós que então deixou aberta a possibilidade para genuínos momentos de raciocínio(coletivo)-em-ação.

ii) *Simplificar o processo de conversação*—No espaço-nós permitido pelo desenho, parte da conversa entre os dois alunos ocorreu através de ações incorporadas no desenho que funcionaram para simplificar a conversa. Os gestos têm sido reconhecidos como uma forma essencial de ações incorporadas na linguagem verbal que facilitam a comunicação (e.g., DeLiema et al., 2021; Hostetter & Alibali, 2019; Kang & Tversky, 2016; Mathayas et al., 2019; Roth & Welzer, 2001; Zhang, 1997). Contudo, poucos estudos focaram a sua atenção nas funções das ações incorporadas no desenho, como o uso de gestos (e.g., Osbeck & Nersessian, 2014; Tholander et al., 2008; Wardak, 2017). Neste caso, o papel dos gestos foi trazer os vários recursos para a conversa, focando a atenção dos alunos. Esses gestos foram frequentemente acompanhados por pronomes demonstrativos, como “este” ou “aquele”, trazendo facilmente para a conversa as entidades representadas no desenho, evitando o uso de uma linguagem complicada e ajudando ao estabelecimento e manutenção de uma base comum para a conversa. E, deste modo, os gestos no desenho permitiram eliminar a necessidade de longas e repetidas descrições verbais. Adicionalmente, os gestos no desenho contribuíram para tornar a conversa dos dois alunos altamente contextual e

fluente, com o mínimo de recursos verbais, permitindo assim articular mais ideias ao longo da interação.

Em suma, o argumento que se procura aqui trazer é que o desenho, enquanto atividade colaborativa, tem o potencial para desenvolver formas superiores de raciocínio, como o raciocínio mecanicista. Este potencial não se esgota nas potencialidades representativas do desenho enquanto meio visual-espacial para a criação de representações externas que têm, por sua vez, o potencial de ajudar a visualizar algo para uma melhor compreensão. Com efeito, as potencialidades do desenho estendem-se à possibilidade de (inter)agir em algo como forma de raciocínio-em-ação. Adicionalmente, a criação de um desenho em conjunto promove a colaboração, ao permitir um genuíno espaço de cooperação mútua e atenção conjunta, e simplificando a comunicação.

## **5.4 | Implicações**

Nos três estudos que compreendem a presente dissertação, foi proposto um sistema de análise para as explicações científicas dos alunos; identificaram-se e caracterizaram-se as explicações científicas dos alunos com base nesse sistema; comparou-se e examinou-se a progressão das suas explicações quando envolvidos numa estratégia didática baseada na criação de desenhos; mostrou-se, através da micro-análise multimodal aplicada à interação de um par de alunos criando desenhos colaborativamente, como é gerado o seu raciocínio mecanicista—i.e., o raciocínio necessário para a construção de explicações científicas; e, por último, identificaram-se algumas das interações cognitivas e sociais que são permitidas e facilitadas na criação colaborativa de desenhos, essenciais para gerar processos de raciocínio mecanicista. Em seguida apresentam-se algumas das implicações e considerações deste trabalho para a investigação educacional e prática, bem como algumas das suas limitações.

### **5.4.1 | Implicações para a investigação educacional**

No primeiro estudo, na ausência de um referencial de análise para caracterizar de forma sistemática as explicações científicas dos alunos, foi proposto um sistema de análise em níveis sucessivos de força explicativa que permite caracterizar e examinar a progressão dos alunos nas suas explicações. A sua aplicação em diferentes estudos empíricos (e.g., Andrade et al., 2019; Andrade et al., 2021; Mc Lure, 2022; McLure et al., 2021) mostrou

que este sistema de análise fornece um valioso instrumento para aqueles interessados em investigar um conceito que tem sido difícil de definir, bem como a progressão numa prática —construção de explicações—que tem sido pouco considerada e difícil de avaliar. Conclui-se com um nota de precaução que este sistema não foi desenvolvido com a intenção de ser um instrumento pedagógico, mas sim de análise fenomenológica. De facto, não existem quaisquer evidências de que utilizar os níveis aqui identificados como estruturas de apoio para os alunos levaria à construção de melhores explicações. Para mais, tal abordagem poder-se-ia transformar em algo como a resolução de um exercício, o que contrasta com a ideia de envolver os alunos na prática de construir explicações científicas (Krist et al., 2019; NRC, 2012), i.e., envolver os alunos no questionamento do mundo natural em seu redor e na descoberta de como e porquê os seus fenómenos ocorrem.

No Estudo III, para compreender como é gerado o raciocínio mecanicista dos alunos, foi aplicado um referencial recente de Krist e seus colegas (2019)—as heurísticas epistémicas essenciais para o raciocínio mecanicista [HEERM]. A vantagem deste referencial é que olha para estratégias práticas de raciocínio (heurística) que guiam os alunos quando envolvidos na construção de explicações, em vez dos elementos conceptuais constituintes da explicação. Mais, permite analisar estas heurísticas independentemente da "correção" do seu conteúdo científico. Desta forma é possível avaliar a complexidade do raciocínio mecanicista dos alunos, mesmo quando os conceitos envolvidos ainda não se encontram claros. Até à data (que se conheça) este é o primeiro estudo onde este referencial foi aplicado para caracterizar o raciocínio dos alunos a ocorrer numa interação. Desta forma, este estudo contribuiu com evidências empíricas que corroboram a sua praticabilidade e produtividade como referencial analítico para examinar em detalhe o processo pelo qual os alunos geram o seu raciocínio mecanicista na explicação de um fenómeno.

Até ao momento, uma das lacunas na literatura em explicações científicas e raciocínio mecanicista tem sido conhecer em maior detalhe os processo pelos quais os alunos desenvolvem o raciocínio que lhes permite envolverem-se na prática de construir explicações científicas. No Estudo II foi possível mostrar que através de uma sequência didática baseada na criação de desenhos, as explicações dos alunos progrediram para níveis superiores de força explicativa. No Estudo III, ao aplicar as HEERM numa análise ao nível micro, foi possível começar a compreender melhor como é gerado e organizado o

raciocínio mecanicista dos alunos que lhes permite progredir na construção das suas explicações.

Uma vez que o foco foi apenas na interação de dois alunos ao longo de uma sessão de 90 minutos, quaisquer generalizações devem ser feitas com precaução. No entanto, neste caso, uma análise próxima e com grande detalhe deste par de alunos não só revelou ser adequada como necessária. Este nível de detalhe possibilitou descer para o nível inferior ao nível dos fenómenos, i.e., para o nível dos mecanismos subjacentes às interações dos alunos, e a esse nível inferir alguns dos processos únicos pelos quais os alunos progrediram na prática de construir explicações. Conforme Sfard e Kieran (2001, p.70) argumentam, "ao usar um microscópio, pode-se descobrir um mundo totalmente novo de relações complexas e fenómenos ricos".

Outro aspeto é que este caso foi extraído de um contexto particular. Um contexto fora da sala de aula em que os alunos participaram voluntariamente durante um período de férias. Estes alunos sabiam que estariam envolvidos numa investigação com o objetivo de compreender os seus processos de raciocínio e a forma como interagiam com o desenho. Sabe-se que considerações sobre o contexto influenciam a forma como uma determinada tarefa é percebida ou como uma determinada interação é direcionada (Hammer et al., 2005; Kapon, 2017; Tannen, 1993). Com efeito, é provável que um contexto particular tenha levado os alunos a enquadrar a sua interação como um processo de "dar sentido a algo", em vez de um processo de "resolver uma tarefa para apresentar a resposta correta". De facto, o processo de criação de sentido evidenciado para estes dois alunos enquanto tentavam descobrir como e porquê um fenómeno em estudo ocorreu, pode, em parte, ser atribuído a este contexto em particular, diferente do da sala de aula.

Ainda outro aspeto a salientar é que este caso decorreu com intervenções mínimas no sentido de guiar ou provocar o raciocínio dos alunos, uma vez que o objetivo era captar aspetos do seu raciocínio que ocorrem espontaneamente. Mais investigação será necessária para perceber, em contexto de sala de aula, qual o papel do professor enquanto guia das aprendizagens dos alunos e qual pode ser o papel do desenho na interação professor-aluno(s). Enquanto observadora não participante das aulas onde foi aplicada a estratégia didática desenvolvida no Estudo II, a perceção da investigadora é que o desenho promove momentos ricos de diálogo professor-aluno. Momentos de trocas autênticas de ideais onde os alunos usaram os seus desenhos para expressarem as suas

ideias à professora de forma mais explícita e criativa. Noutros momentos, os desenhos dos alunos foram utilizados pela professora para sublinhar uma ideia importante e discuti-la com os alunos. Uma linha de investigação futura nesta área será necessária para perceber como apoiar os professores em sala de aula a usar os desenhos dos alunos—produtos genuínos das suas ideias e criatividade—para guiá-los no sentido de desenvolverem conhecimentos mais próximos das ideais canónicas da ciência.

Por último, no Estudo III, ilustrou-se como uma análise detalhada da interação com o desenho é capaz de revelar complexidades centrais no raciocínio mecanicista dos alunos, que a análise do desenho apenas como uma representação externa de algo não consegue revelar. Por exemplo, foram evidenciados momentos dos alunos a raciocinar sobre entidades, propriedades e interações que não existiam como representações visuais concretas no desenho, mas que foram encenadas em interações incorporadas com o desenho. Por exemplo, foi somente por meio de uma análise multimodal que, neste caso, foi possível discernir a criação e uso de certos modelos animados e outras formas de raciocínio-em-ação. Foi igualmente por meio desta análise que, em muitos momentos, foi possível entender o sentido da conversa entre os dois alunos. Assim, quando os desenhos são analisados como representações externas das ideias dos alunos, muito fica por explicar. De facto, muitas das inconsistências relativamente aos benefícios do desenho poderão vir a tornar-se mais claras se os desenhos não forem analisados unicamente como entidades independentes ao ambiente da sua criação. Este é um aspeto importante para investigações focadas no papel do desenho ou de outros recursos que estejam dependentes da interação com o meio onde são criados. No presente estudo mostrou-se que o panorama final obtido por meio de uma análise multimodal será claramente diferente daquele que se obteria por uma tradicional análise de conteúdo.

#### **5.4.2 | Implicações para a prática**

Esta tese contribui também com relevante conhecimento para a prática. Na literatura em educação em ciência é feito um apelo para envolver os alunos na construção de explicações científicas. No entanto, é reportado que frequentemente os alunos constroem potenciais explicações que não possuem (ou quando presente é incompleto) um relato lógico e coerente dos mecanismos subjacentes ao fenómeno em explicação. Em parte, estes resultados têm sido associados à complexidade inerente aos fenómenos da química, que constitui um nível adicional de dificuldade. Mais especificamente, aos níveis



escalares envolvidos (macroscópico—submicroscópico), ao facto de serem emergentes e, por vezes, contra-intuitivos (Samon & Levy, 2017; Tümay, 2016).

No Estudo II propôs-se uma estratégia didáctica baseada em desenhos para apoiar a construção de explicações, mostrando-se como os alunos progrediram de explicações superficiais para explicações mecanicistas, bem como de formas de pensar intuitivas para formas mais sofisticadas. No caso apresentado no Estudo III, observou-se que a criação de desenhos provoca certas ideias intuitivas que ao serem exploradas e testadas evoluíram para ideias mais sofisticadas. Adicionalmente, observou-se que a criação de desenhos envolve os alunos num processo de criação de sentidos mais próximo das formas autênticas de pensar na prática científica, e.g., "como é que algo funciona", "que conhecimento eu tenho que pode ser útil para perceber o que está a acontecer". Estes estudos trazem importantes evidências que reforçam o apelo para mudar a perspetiva da sala de aula de ciências. Mais especificamente, em vez de oferecer ou convencer os alunos a adoptar a "melhor" explicação, ao levá-los a construírem as suas explicações, os alunos exploram detalhes, colocam questões e estendem os seus limites. Neste processo passam a considerar formas de pensar mais sofisticadas e propor explicações mais completas. O caso que é apresentado no Estudo III constitui um exemplo, tanto útil como inspirador, para professores que procurem implementar a prática de construir explicações na sua sala de aula. Este caso mostra um exemplo do que pode ser o trabalho dos alunos quando envolvidos numa estratégia baseada em desenhos para apoiar a construção de explicações; nos moldes daquela que é proposta no Estudo II. A estratégia didáctica proposta na presente tese sugere direcções produtivas para apoiar os alunos a desenvolver formas mais sofisticadas de raciocínio e a construir "melhores" explicações científicas. Espera-se que providencie um guia que possa tornar realidade a prática de construir explicações científicas na sala de aula de ciências, bem como uma forma produtiva de aprendizagem em geral.

O papel do desenho nas interações sociais revelado no Estudo III traz ainda implicações que podem ser estendidas à sala de aula de outras áreas disciplinares. Incentivar o desenho colaborativo promove a colaboração. A criação de um desenho em conjunto ajuda a estabelecer a atenção mútua das partes envolvidas na colaboração, garantido que as suas ideias privadas e intenções sejam consideradas. Adicionalmente, o desenho simplifica a conversação ao permitir gestos no desenho para transmitir informação

de forma mais eficiente. Ao considerar a criação de desenhos, a componente das ações incorporadas no desenho (como gestos) é uma componente importante, pois parte da eficácia do desenho depende desta componente. Com efeito, na criação de desenhos, os alunos devem ser estimulados a interagirem com os seus desenhos, por exemplo, pedindo explicitamente para comunicarem as suas ideias através do desenho. Na criação de desenhos, a componente colaborativa tem o potencial para estimular a interatividade entre os alunos, promovendo a colaboração.

Um recente interesse para a educação em ciência é proporcionar oportunidades para que os alunos se envolvam na prática de construção de explicações científicas, levando-os a raciocinar de forma mecanicista sobre os fenômenos em explicação (NCR, 2012). Por outro lado, o uso e criação de representações visuais, mais especificamente o desenho, tem suscitado interesse como uma ferramenta com potencial para facilitar as aprendizagens dos alunos em ciência.

Nos três estudos que compreendem esta tese, mostrou-se que as explicações inicialmente superficiais e incompletas dos alunos—que descrevem o que acontece, mas não relatam ou relatam de forma incompleta ou fragmentada os mecanismos pelos quais acontece—podem evoluir para explicações mais coerentes e completas quando envolvidos na criação e uso de desenhos para apoiar a construção das suas explicações. Adicionalmente, mostraram-se algumas das formas únicas como o desenho pode apoiar a construção de explicações científicas, nomeadamente i) como "porta-de-entrada" para os alunos raciocinarem de forma mecanicista sobre um fenômeno que tentam explicar, e na concretização dessa forma de pensar; e ii) como facilitador de processos colaborativos. Mostrou-se, ainda, que o potencial do desenho para aprender—neste caso em particular o desenho colaborativo—não se restringe ao processo cognitivo relacionado com a atividade de criar uma representação visual externa num meio material, mas que o seu potencial está em parte na interação em torno desse meio. Conclui-se com a posição de que criar um desenho é um processo que se estende para lá do ato de criar uma ferramenta para pensar e comunicar. É, assim, o ato de pensar e comunicar em si mesmo; e deve ser estudado e usado na sala de aula como tal.

## Referências

- Abrahamson, D., & Lindgren, R. (2014). Embodiment and Embodied Design. In Sawyer R.K. (Ed.), *The Cambridge Handbook of the Learning Sciences: Part III—Practices that Foster Effective Learning* (pp. 358–376). Cambridge University Press.
- AERA (2011). *Code of ethics. Educational Researcher*, 40(3), 145-156. doi: 10.3102/0013189X11410403.
- Andrade, V., Freire, S. & Baptista, M. (2019). Constructing Scientific Explanations: a System of Analysis for Students' Explanations. *Research in Science Education*, 49, 787–807.
- Andrade, V., Freire, S. & Baptista, M. (2019). Constructing Scientific Explanations for Chemical Phenomenon through Drawing among 8th-grade Students. *EURASIA Journal of Mathematics, Science and Technology Education*, 17(1), 1–13.
- Ainsworth, S., Prain, V., & Tytler, R. (2011). Drawing to learn in science. *Science*, 333, 1096-1097.
- Akaygun, S. (2016). Is the oxygen atom static or dynamic? The effect of generating animations on students' mental models of atomic structure. *Chemistry Education Research and Practice*, 17, 88–807.
- Akaygun, S., & Jones, L. L. (2013). Research-based design and development of a simulation of liquid–vapor equilibrium. *Chemistry Education Research and Practice*, 14, 324-344.
- Ardac, D., & Akaygun, S. (2004). Effectiveness of multimedia-based instruction that emphasizes molecular representations on students' understanding of chemical change. *Journal of Research in Science Teaching* 41(4), 317–337.
- Ardac, D., & Akaygun, S. (2005). Using Static and Dynamic Visuals to Represent Chemical Change at Molecular Level. *International Journal of Science Education*, 27(11), 1269-1298.
- Andrade, V., Freire, S. & Baptista, M. (2019). Constructing Scientific Explanations: a System of Analysis for Students' Explanations. *Research in science education*, 49, 787–807.
- Baldry, A., & Thibault, P. J. (2006). *Multimodal transcription and text analysis*. London: Equinox.
- Barke, H. D., Hazari, A., & Yitbarek, S. (2009). *Misconceptions in chemistry: Addressing Perceptions in Chemical Education*. Springer.
- Barsalou, L. W. (2008). Grounded cognition. *Annual Review of Psychology*, 59, 617–645.
- Barth–Cohen, L. (2018). Threads of local continuity between centralized and decentralized causality: Transitional explanations for the behavior of a complex system. *Instructional Science*, 46(5), 681–705.
- Bechtel, W., & Abrahamsen, A. (2005). Explanation: A mechanist alternative. *Studies in History and Philosophy of Biological and Biomedical Sciences*, 36, 421 – 441.
- Becker, N., Noyes, K., & Cooper, M. (2016). Characterizing students' mechanistic reasoning about london dispersion forces. *Journal of Chemistry Education*, 93, 1713-1724.

- Ben-Zvi, R., Eylon, B-S., & Silberstein, J. (1986). Is an atom of copper malleable? *Journal of Chemical Education*, 63, 64–66.
- Bezemer, J., & Jewitt, C. (2018). Multimodality: A guide for linguists. In L. Litoseliti (Ed.), *Research methods in linguistics* (2nd ed., pp. 281–303). Continuum.
- Bilda, Z., Gero, J. S., & Purcell, T. (2006). To sketch or not to sketch? That is the question. *Design Studies*, 27(5), 587-613.
- Bobek, E., & Tversky, B. (2016). Creating visual explanations improves learning. *Cognitive Research: Principles and Implications*, 1(27), 1-14.
- Bolger, M. S., Kobiela, M., Weinberg, P. J., & Lehrer, R. (2012). Children's mechanistic reasoning. *Cognition and Instruction*, 30(2), 170-206.
- Braaten, M., & Windschitl, M. (2011). Working toward a stronger conceptualization of scientific explanation for science education. *Science Education*, 95(4), 639-669.
- Bresler, L., & Stake, R. E. (1992). Qualitative research methodology in music education. In R. Colwell (Ed.), *Handbook of research on music teaching and learning* (pp. 75–90). Schirmer Books.
- Brewer, W. F., Chinn, C. A., & Samarapungavan, A. (1998). Explanation in scientists and children. *Minds and Machines*, 8(1), 119 –136.
- Brigandt, I. (2016). Why the Difference Between Explanation and Argument Matters to Science Education. *Science & Education*, 25, 251–275.
- Chang, H. Y., Quintana, C., & Krajcik, J. (2009). The Impact of Designing and Evaluating Molecular Animations on How Well Middle School Students Understand the Particulate Nature of Matter. *Science Education*, 94(1), 73-94.
- Chang, H. Y., Quintana, C., & Krajcik, J. (2014). Using drawing technology to assess students' visualizations of chemical reaction processes. *Journal of Science Education and Technology*, 23, 355-369.
- Chi, M. T. H. (1997). Quantifying qualitative analyses of verbal data: A practical guide. *Journal of the Learning Sciences*, 6(3), 271–315.
- Chi, M. T. H. (2009). Active–constructive–interactive: a conceptual framework for differentiating learning activities. *Topics in Cognitive Science*, 1, 73–105.
- Chi, M. T. H., & Wylie, R. (2014). The ICAP Framework: Linking cognitive engagement to active learning outcomes. *Educational Psychologist*, 49(4), 219-243.
- Clark, A. (1998). Embodied, situated, and distributed cognition. In W. Bechtel & G. Graham (Eds.), *A companion to cognitive science* (pp. 506–517). Blackwell.
- Cohen, L., Manion, L., & Morison, K. (2007). *Research methods in education*. Routledge (e-Library).
- Comissão Europeia (2007). *Science education now: A renewed pedagogy for future of Europe*. Directorate-General for Research, European Commission. <https://www.eesc.europa.eu/sites/default/files/resources/docs/rapportrocardfinal.pdf>

- Cook, M. P. (2006). Visual representations in science education: The influence of prior knowledge and cognitive load theory on instructional design principles. *Science Education*, 90(6), 1073–1091.
- Cooper, M. M. (2015). Why Ask Why? *Journal of Chemistry Education*, 92, 1273–1279.
- Cooper, M. M., Stieff, M., & DeSutter, D. (2017). Sketching the invisible to predict the visible: From drawing to modelling in chemistry. *Topics in Cognitive Science*, 9, 1-19.
- Cooper, M. M., & Stowe, R. L. (2018). Chemistry Education Research From—Personal Empiricism to Evidence, Theory, and Informed Practice. *Chemical Reviews*, 118(12), 6053-6087.
- Cooper, M. M., Williams, L. C., & Underwood, S. M. (2015). Student understanding of intermolecular forces: A multimodal study. *Journal of Chemical Education*, 92(8), 1288–1298.
- Cowan, K. (2014). Multimodal transcription of video: Examining interaction in early years classrooms. *Classroom Discourse*, 5(1), 6–21.
- Craver, C., & Darden, L. (2013). *In Search of Mechanisms: Discoveries across the Life Sciences*. The University of Chicago Press.
- Craver, C., & Tabery, J. (2015). Mechanisms in Science. The Stanford Encyclopedia of Philosophy. In Edward N. Zalta (Ed.), (Winter Edition). <https://plato.stanford.edu/archives/sum2019/entries/science-mechanisms/>
- Cuzzolino, M. P. , & Grotzer, T. A., Tutwiler, M. S., & Torres, E W. (2019). An agentic focus may limit learning about complex causality and systems dynamics: A study of seventh graders' explanations of ecosystems. *Journal of Research in Science Teaching*, 1–23.
- Darden, L. (2002). Strategies for discovering mechanisms: Schema instantiation, modular subassembly, forward/backward chaining. *Philosophy of Science*, 69(S3), S354–S365.
- DeLiema, D., & Enyedy, N., Steen, F., & Danish, A. J. (2021). Integrating Viewpoint and Space: How Lamination across Gesture, Body Movement, Language, and Material Resources Shapes Learning. *Cognition and Instruction*, 39(3), 328-365.
- diSessa, A. A., (1993). Toward an Epistemology of Physics. *Cognition and Instruction*, 10(2-3), 105-225.
- diSessa, A. A., (2004) Metarepresentation: Native Competence and Targets for Instruction. *Cognition and Instruction*, 22(3), 293-33.
- Driver, R., Leach, J., Millar, R., & Scott, P. (1996). *Young people's images of science*. Open University Press.
- Duschl, R. (2008). Science education in three-part harmony: Balancing conceptual, epistemic, and social learning goals. *Review of Research in Education*, 32(1), 268–291.
- Eberle, T. S. (2005, May). Promoting qualitative research in Switzerland. *Forum Qualitative Sozialforschung/Forum: Qualitative Social Research*, 6(2), Art. 31. <http://www.qualitative-research.net/fqs-texte/2-05/05-2-31-e.htm>

- Evagorou, M., Erduran, S., & Mäntylä, T. (2015). The role of visual representations in scientific practices: from conceptual understanding and knowledge generation to 'seeing' how science works. *International Journal of STEM Education*, 2(11), 1-13.
- Fan, J. E. (2015). Drawing to learn: How producing graphical representations enhances scientific thinking. *Translational Issues in Psychological Science*, 1(2), 170–181.
- Faria, C., Freire, S., Baptista, M., & Galvão, C. (2014). The Construction of a Reasoned Explanation of a Health Phenomenon: An analysis of competencies mobilized. *International Journal of Science Education*, 36(9), 1476–1490.
- Forbus, K. D., & Ainsworth, S. (2017). Editors' Introduction: Sketching and Cognition. *Topics in Cognitive Science*, 9(4), 864–865.
- Fortus, D., Shwartz, Y. & Rosenfeld, S. (2016). High School Students' Meta-Modeling Knowledge. *Research in Science Education* 46, 787–810.
- Friedman, M. (1974). Explanation and scientific understanding. *The Journal of Philosophy*, 71(1), 5–19.
- Gilbert, J. K. (2005). *Visualization in science education*. Dordrecht, The Netherlands: Springer.
- Gilbert, J. K., Boulter, C., & Rutherford, M. (1998a). Models in explanations, Part 1: Horses for courses? *International Journal of Science Education*, 20(1), 83—97.
- Gilbert, J. K., Boulter, C., & Rutherford, M. (1998b). Models in explanations, Part 2: Whose voice? Whose ears? *International Journal of Science Education*, 20(2), 187–203.
- Greene, J. C., Caracelli, V. J., & Graham, W. F. (1989). Toward a conceptual framework for mixed-method evaluation designs. *Educational Evaluation & Policy Analysis*, 11(3), 255–274.
- Grotzer, T. A. (2003). Learning to Understand the Forms of Causality Implicit in Scientifically Accepted Explanations. *Studies in Science Education*, 39(1), 1-74.
- Grotzer, T. A., & Tutwiler, M. S. (2014). Simplifying Causal Complexity: How Interactions Between Modes of Causal Induction and Information Availability Lead to Heuristic-Driven Reasoning. *Mind, Brain, and Education*, 8(3), 97-114.
- Hammer, D., Elby, A., Scherr, R. E., & Redish, E. F. (2005). Resources, framing, and transfer. In J. P. Mestre (Ed.), *Transfer of learning from a modern multidisciplinary perspective* (pp. 89–120). CT: IAP.
- Harlen, W. (2015). *Working with big ideas of science education*. The InterAcademy Partnership (IAP). <https://www.interacademies.org/publication/working-big-ideas-science-education>
- Healey, P.G.T. (2006). *Drawing Things Together: Integrating Modalities and Co-ordinating Understanding*. Sixth IEEE International Conference on Advanced Learning Technologies (ICALT'06), 1200-1201.
- Hostetter, A.B., & Alibali, M.W. (2019). Gesture as simulated action: Revisiting the framework. *Psychonomic Bulletin & Review*, 26, 721–752.

- Hutchins, E. (1995). How a cockpit remembers its speeds. *Cognitive Science*, 19, 265–288.
- Hutchins, E. (2006). The distributed cognition perspective on human interaction. In N. J. Enfield & S. C. Levinson (Eds.), *Roots of human sociality: Culture, cognition and interaction* (pp. 375–398). Berg.
- Hutchins, E. (2014). The cultural ecosystem of human cognition. *Philosophical Psychology*, 27(1), 34–49.
- Instituto de Educação da Universidade de Lisboa. (2016). *Carta Ética para a Investigação em Educação e Formação*. Instituto de Educação da Universidade de Lisboa. <http://www.ie.ulisboa.pt/download/carta-etica-e-regulamento-da-comissao-de-etica>.
- Jewitt, C., Bezemer, J., & O'Halloran, K. (2016). *Introducing Multimodality*. Routledge.
- Johnstone, A. H. (1993). The development of chemistry teaching: A changing response to changing demand. *Journal of Chemical Education*, 70, 701–705.
- Johnson, M. (2009). *The body in the mind: The bodily basis of meaning, imagination, and reason* (Paperback ed., [9. print.]). University of Chicago Press.
- Johnson, P., & Papageorgiou, G. (2010). Rethinking the introduction of particle theory: A substance-based framework. *Journal of Research in Science Teaching*, 47, 130–150.
- Johnson, R. B., & Onwuegbuzie, A. J. (2004). Mixed methods research: A research paradigm whose time has come. *Educational Researcher*, 33(7), 14–26.
- Johnson, B., & Turner, L. A. (2003). Data collection strategies in mixed methods research. In A. T. ashakkori, and C. T. eddlie (Eds.), *Handbook of mixed methods in social and behavioral research* (pp. 297–319). Sage.
- Kapon, S. (2017). Unpacking sensemaking. *Science Education*, 101(1), 165–198.
- Kang, S., & Tversky, B. (2016). From hands to minds: Gestures promote understanding. *Cognitive Research: Principles and Implications*, 1(1), 1–15.
- Kelemen, D. (1999). Why are rocks pointy? Children's preference for teleological explanations of the natural world. *Developmental Psychology*, 35(6), 1440–1452.
- Kelly, R. M., & Jones, L. L. (2008). Investigating Students' Ability To Transfer Ideas Learned from Molecular Animations of the Dissolution Process. *Journal of Chemistry Education*, 85, 303–309.
- Kind, V. (2004). *Beyond appearances: Students' misconceptions about basic chemical ideas*. School of Education, Durham University, England. [https://www.researchgate.net/profile/Vanessa\\_Kind/publication/228799159\\_Beyond\\_Appearances\\_Students'\\_Misconceptions\\_About\\_Basic\\_Chemical\\_Ideas/links/00b7d527900177e5c2000000.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Vanessa_Kind/publication/228799159_Beyond_Appearances_Students'_Misconceptions_About_Basic_Chemical_Ideas/links/00b7d527900177e5c2000000.pdf)
- Kirsh, D. (2011). Using sketching: To think, to recognize, to learn. In A. Kantrowitz, A. Brew, & M. Fava (Eds.), *Thinking through drawing: Practice into knowledge. Proceedings of an interdisciplinary symposium on drawing, cognition and education* (pp. 123–125). Art and Art Education, Teachers College, Columbia University.



- Kitcher, P. (1989). Explanatory unification and the causal structure of the world. In P. Kitcher & W. C. Salmon (Eds.), *Minnesota studies in the philosophy of science: Scientific explanation* (Vol. Vol. XIII, pp. 410–499). University of Minnesota Press.
- Kozma, R. B. (2003). The material features of multiple representations and their cognitive and social affordances for science understanding. *Learning and Instruction*, 13, 205-226.
- Kozma, R., Chin, E., Russell, J., & Marx, N. (2000) The Roles of Representations and Tools in the Chemistry Laboratory and Their Implications for Chemistry Learning, *Journal of the Learning Sciences*, 9(2), 105-143.
- Krist, C., Schwarz, C. V., & Reiser, J. B. (2019). Identifying Essential Epistemic Heuristics for Guiding Mechanistic Reasoning in Science Learning. *Journal of the Learning Sciences*, 28(2), 160-205.
- Krueger, J. (2011). Extended cognition and the space of social interaction. *Consciousness and Cognition*, 20(3), 643–657.
- Krueger, J. (2012). Seeing mind in action. *Phenomenology and the Cognitive Sciences*, 11, 149–173.
- Kulgemeyer, C., & Schecker, H. (2013). Students explaining science—assessment of science communication competence. *Research in Science Education*, 43, 2235–2256.
- Lakoff, G., & Johnson, M. (1980). *Metaphors we live by*. University of Chicago Press. <https://www.press.uchicago.edu/ucp/books/book/chicago/M/bo3637992.html>.
- Langbeheim, E., & Levy, S. T. (2018). Feeling the forces within materials: Bringing intermolecular bonding to the fore using embodied modelling. *International Journal of Science Education*, 40(13), 1567–1586.
- Latour, B. (1999). *Pandora's hope: essays on the reality of science studies*. Harvard University Press.
- Lederman, N. G., Lederman, J. S., & Antink, A. (2013). Nature of science and scientific inquiry as contexts for the learning of science and achievement of scientific literacy. *International Journal of Education in Mathematics, Science and Technology*, 1(3), 138–147.
- Levin, T., & Wagner, T. (2015). Mixed-methodology Research in Science Education: Opportunities and Challenges in Exploring and Enhancing Thinking Dispositions. In M. C. Shelley II L. D. Yore & B. Hand (Eds), *Quality Research in Literacy and Science Education: International Perspectives and Gold Standards* (pp. 213-244). Springer (e-library).
- Levy, S. T., & Wilensky, U. (2009a). Crossing levels and representations: The connected chemistry (CC1) curriculum. *Journal of Science Education and Technology*, 18(3), 223-242.
- Levy, S. T., & Wilensky, U. (2009b). Students' learning with the connected chemistry (CC1) curriculum: Navigating the complexities of the particulate world. *Journal of Science Education and Technology*, 18(3), 243–254.
- Lynch, M., & Woolgar, S. (1990). *Representation in scientific practice*. MIT Press.

- Machamer, P., Darden, L., & Craver, C. (2000). Thinking about mechanisms. *Philosophy of Science*, 67(1), 1–25.
- Manz, E. (2012). Understanding the codevelopment of modelling practice and ecological knowledge. *Science Education*, 96(6), 1071–1105.
- Margel, H., Eylon, B-S., & Scherz, Z. (2008) A Longitudinal Study of Junior High School Students' Conceptions of the Structure of Materials. *Journal of Research in Science Teaching*, 45(1), 132–152.
- Mathayaz, N., Brown, D. E., Wallon, R. C., & Lindgren, R. (2019). Representational gesturing as an epistemic tool for the development of mechanistic explanatory models. *Science Education*, 103(4), 1047–1079.
- McCain, K. (2015). Explanation and the nature of scientific knowledge. *Science & Education*, 24, 827-854.
- McLure, F., Won, M. & Treagust, D.F. (2021). Analysis of Students' Diagrams Explaining Scientific Phenomena. *Research in Science Education*. <https://doi.org/10.1007/s11165-021-10004-y>.
- McLure, F. (2022). The Thinking Frames Approach: Improving High School Students' Written Explanations of Phenomena in Science. *Research in Science Education*. <https://doi.org/10.1007/s11165-022-10052-y>.
- McNeill, K. L., Lizotte, D. J., Krajcik, J., & Marx, R. W. (2006). Supporting students' construction of scientific explanations by fading scaffolds in instructional materials. *Journal of the Learning Sciences*, 15, 153–191.
- MED (Ministério da Educação e Ciência) (2013). *Metas Curriculares do 3.o Ciclo do Ensino Básico: Ciências Físico-Químicas*. Lisboa, Ministério da Educação e Ciência.
- Merritt, J. D., Krajcik, J., & Schwartz, Y. (2008). Development of a learning progression for the particle model of matter. *Proceedings of the ICLS Conference*.
- Moreira, P., Marzabal, A., & Talanquer, V. (2018). Using a mechanistic framework to characterise chemistry students' reasoning in written explanations. *Chemistry Education Research and practice*, 20, 120- 131.
- Nakhleh, M. (1992). Why some students don't learn chemistry. *Journal of Chemical Education*, 69(3), 191–196.
- Nersessian, N. J. (2006). The cognitive-cultural systems of the research laboratory. *Organization Studies*, 27(1), 125–145.
- Nersessian, N. J. (2008). *Creating scientific concepts*. MIT Press.
- NGSS Lead States (2013). *Next generations science standards: For states, by states*. National Academies Press.
- Norris, S. (2004). *Analyzing multimodal interaction: A methodological framework*. Routledge.
- NRC (National Research Council) (2012). *A framework for K-12 science education: Practices, crosscutting concepts, and core ideas*. National Academies Press.

- Odden, T. O. B., & Russ, R. S. (2019). Defining sensemaking: Bringing clarity to a fragmented theoretical construct. *Science Education*, 103(1), 187–205.
- Olympiou, G., Zacharia, Z., & deJong, T. (2013). Making the invisible visible: enhancing students' conceptual understanding by introducing representations of abstract objects in a simulation. *Instructional Sciences*, 41, 575–596.
- Osbeck, L.M., & Nersessian, N.J. (2006) The Distribution of Representation. *Journal of The Theory Social Behaviour*, 36, 0021–8308.
- Osbeck, L.M., & Nersessian, N.J. (2014). Situating distributed cognition. *Philosophical Psychology*, 27(1), 82-97.
- Osborne, J. (2014). Teaching scientific practices: meeting the challenge of change. *Journal of Science Teacher Education*, 25(2), 177–196.
- Osborne, J., & Dillon, J. (2008). *Science Education in Europe: Critical Reflections*. A Report to the Nuffield Foundation. [https://www.nuffieldfoundation.org/wp-content/uploads/2019/12/Sci\\_Ed\\_in\\_Europe\\_Report\\_Final1.pdf](https://www.nuffieldfoundation.org/wp-content/uploads/2019/12/Sci_Ed_in_Europe_Report_Final1.pdf)
- Osborne, J. F., & Patterson, A. (2011). Scientific argument and explanation: A necessary distinction? *Science Education*, 95, 627–638.
- Papadouris, N., Vokos, S., & Constantinou CP. (2017). The pursuit of a “better” explanation as an organizing framework for science teaching and learning. *Science Education*, 1–19.
- Papageorgiou, G. (2013). Can Simple Particle Models Support Satisfying Explanations of Chemical Changes for Young Students? In G. Tsapalis & H. Sevan (Eds), *Concepts of Matter in Science Education* (pp. 319-330). Springer (e-library).
- Park, J., Song, J. (2020). How Is Intuitive Thinking Shared and Elaborated During Small-Group Problem-Solving Activities on Thermal Phenomena?. *Research in Science Education*, 50, 2363–2390.
- Park, J., Tang, K.-S., & Chang, J. (2021). Plan–Draw–Evaluate (PDE) pattern in students' collaborative drawing: Interaction between visual and verbal modes of representation. *Science Education*, 1–33.
- Parnafes, O. (2010). Representational Practices in the Activity of Student-Generated Representations (SGR) for Promoting Conceptual Understanding. *Proceedings of the ICLS Conference ICLS*, 301.
- Parnafes, O. (2012). Developing Explanations and Developing Understanding: Students Explain the Phases of the Moon Using Visual Representations. *Cognition and Instruction*, 30(4), 359—403.
- Parnafes, O., & diSessa, A. A. (2013). Microgenetic Learning Analysis: A Methodology for Studying Knowledge in Transition. *Human Development*, 56, 5–37.
- Patton, M. Q. (2002). Designing qualitative studies. *Qualitative Research and Evaluation Methods*, 3, 230–246.

- Perkins, D.N., & Grotzer, T. A.(2005), Dimensions of Causal Understanding: the Role of Complex Causal Models in Students' Understanding of Science. *Studies in Science Education*, 41(1), 117-165.
- Phillips, D. C. (2005). The contested nature of empirical educational research (and why philosophy of education offers little help). *Journal of Philosophy of Education*, 39(4), 577–597.
- Prain, V., Tytler, R., & Peterson, S. (2009). Multiple Representation in Learning About Evaporation. *International Journal of Science Education*, 31(6), 787-808.
- Quillin, K. & Thomas, S. (2015). Drawing-to-Learn: A Framework for Using Drawings to Promote Model-Based Reasoning in Biology. *CBE–Life Sciences Education*, 14, 1–16.
- Rappoport, L. T., & Ashkenazi, G. (2008). Connecting levels of representation: Emergent versus submergent perspective. *International Journal of Science Education*, 30(12).
- Rönnebeck, S., Bernholt, S., & Ropohl, M. (2016): Searching for a common ground – A literature review of empirical research on scientific inquiry activities. *Studies in Science Education*, 52(2), 161-197.
- Rosenthal, D. P., & Sanger, M. J. (2012). Student misinterpretations and misconceptions based on their explanations of two computer animations of varying complexity depicting the same oxidation–reduction reaction. *Chemistry Education Research and Practice*, 13(4), 471–483.
- Roth, W.-M., Bowen, G. M., & McGinn, M. K. (1999). Differences in graph-related practices between high school biology textbooks and scientific ecology journals. *Journal of Research in Science Teaching*, 36, 977–1019.
- Roth, W. M., & Welzel, M. (2001). From activity to gestures and scientific language. *Journal of Research in Science Teaching*, 38(1), 103–136.
- Rottman, B. M., & Keil, F. C. (2011). What matters in scientific explanations: Effects of elaboration and content. *Cognition*, 121, 324–337.
- Ruiz-Primo, M., Li, M., Tsai, S. P., & Schneider, J. (2010). Testing One Premise of Scientific Inquiry in Science Classrooms: Examining Students' Scientific Explanations and Student Learning. *Journal of Research in science teaching*, 47(5), 583–608.
- Russ, R. S., Scherr, R. E., Hammer, D., & Mikeska, J. (2008). Recognizing mechanistic reasoning in student scientific inquiry: A framework for discourse analysis developed from philosophy of science. *Science Education*, 92(3), 499–525.
- Ryan, S., & Stieff, M. (2019). Drawing for Assessing Learning Outcomes in Chemistry. *Journal of Chemistry Education*, 96(9), 1813-1820.
- Salmon, W. C. (1984). *Scientific explanation and the causal structure of the world*. Princeton University Press.
- Samon, S., & Levy, S. T. (2017). Micro–macro compatibility: When does a complex systems approach strongly benefit science learning? *Science Education*, 101, 985–1014.

- Schwarz, C. V., Reiser, B. J., Davis, E. A., Kenyon, L., Achér, A., Fortus, D., ... (2009). Developing a learning progression for scientific modelling: Making scientific modelling accessible and meaningful for learners. *Journal of Research in Science Teaching*, 46(6), 632-654.
- Sevian, H., & Stains, M. (2013). Implicit Assumptions and progress variables in a learning progression about structure and motion of matter, In G. Tsapalis & H. Sevian (Eds), *Concepts of Matter in Science Education* (pp. 69-95). Springer (e-library).
- Sfard, A., & Kieran, C. (2001). Cognition as communication: Rethinking learning-by-talking through multi-faceted analysis of students' mathematical interactions. *Mind, Culture, and Activity*, 8(1), 42-76.
- Stieff, M. (2011a). Improving representational competence using molecular simulations embedded in inquiry activities. *Journal of Research in Science Teaching*, 48(10), 1137-1158.
- Stieff, M., & deSutter, D. (2016, June). *Drawing from dynamic visualizations*. [conference presentation. The International Conference of the Learning Sciences, Singapore.
- Stieff, M., & Raje, S. (2010). Expert algorithmic and imagistic problem solving strategies in advanced chemistry. *Spatial Cognition and Computation*, 10(1), 53-81.
- Strauss, A., & Corbin, J., (1998). *Basic of qualitative research. Techniques and procedures for de- veloping grounded theory*. Sage.
- Strevens, M. (2008). *Depth: an Account of Scientific Explanation*. Cambridge. Harvard University Press.
- Strevens, M. (2013). No understanding without explanation. *Studies in History and Philosophy of Science*, 44, 510-515.
- Solomon, J. (1986). Children's explanations. *Oxford Review of Education*, 12, 41-51.
- Solomonidou, C., & Stavridou, H. (2000). From inert objects to chemical substance: Students' initial conceptions and conceptual development during an introductory experimental chemistry sequence. *Science Education*, 84(3), 382-400.
- Songer, N., B., & Gotwals, A., W. (2012). Guiding Explanation Construction by Children at the Entry Points of Learning Progressions. *Journal of Research in Science Teaching*, 49(2), 141-165.
- Southard, K. M., Espindola, M. R., Zaepfel, S. D., & Bolger, M. S. (2017). Generative mechanistic explanation building in undergraduate molecular and cellular biology. *International Journal of Science Education*, 39(13), 1795-1829.
- Swift, B. (2006). Preparing numerical data. In R. Sapsford, & V. Jupp (Eds.), *Data collection and analysis: Part III Data analysis* (2nd ed., pp. 153-182). SAGE.
- Taber, K. S. (2013). Revisiting the chemistry triplet: drawing upon the nature of chemical knowledge and the psychology of learning to inform chemistry education. *Chemistry Education Research and Practice*, 14(2), 156-168.

- Taber, K.S. (2019). Progressing chemistry education research as a disciplinary field. *Disciplinary and Interdisciplinary Science Education Research*, 1(5), 1-8.
- Taber, K. S., & García-Franco, A. (2010). Learning processes in chemistry: Drawing upon cognitive resources to learn about the particulate structure of matter. *Journal of the Learning Science*, 19(1), 99–142.
- Tannen, D. (1993). What's in a frame?: Surface evidence for underlying expectations. In *Framing in discourse* (pp. 14–56). Oxford University Press.
- Talanquer, V. (2007). Explanations and teleology in chemistry education. *International Journal of Science Education*, 29(7), 853–870.
- Talanquer, V. (2009). On cognitive constraints and learning progressions: The case of "structure of matter". *International Journal of Science Education*, 31(15), 2123-2136.
- Talanquer, V. (2010). Exploring dominant types of explanations built by general chemistry students. *International Journal of Science Education*, 32(18), 2393–2412.
- Talanquer, V. (2011). Macro, Submicro, and Symbolic: The many faces of the chemistry "triplet". *International Journal of Science Education*, 33(2), 179–195.
- Talanquer, V. (2014). Chemistry education: Ten heuristics to tame. *Journal of Chemical Education*, 91(8), 1091–1097.
- Talanquer, V. (2015). Threshold Concepts in Chemistry: The Critical Role of Implicit Schemas. *Journal of Chemistry education*, 92 (1), 3-9.
- Talanquer, V. (2018a). Chemical rationales: another triplet for chemical thinking. *International Journal of Science Education*, 40(15) 1874-1890.
- Talanquer, V. (2018b). Exploring mechanistic reasoning in chemistry. In Yeo J., Teo T. W. and Tang K. S. (ed.), *Science Education Research and Practice in Asia-Pacific and Beyond* (pp. 39-52). Springer.
- Tang, K. (2016). Constructing scientific explanations through premise–reasoning–outcome (PRO): an exploratory study to scaffold students in structuring written explanations. *International Journal of Science Education*, 38(9), 1415-1440.
- Tang, X., Elby, A., & Hammer, D. (2020). The tension between pattern-seeking and mechanistic reasoning in explanation construction: A case from Chinese elementary science classroom. *Science Education*, 104, 1071–1099.
- Thagard, P. (2007). Coherence, truth, and the development of scientific knowledge. *Philosophy of Science*, 74, 28-47.
- Tholander, J., Karlgren, K., Ramberg, R., & Sökjer, P. (2008). *Where All the Interaction Is Sketching in Interaction Design as an Embodied Practice*. *Proceedings of the 7th ACM conference on Designing interactive systems*, Cape Town, South Africa, 445–454.
- Tuckman, B. (2012). *Manual de investigação em educação*. Fundação Calouste Gulbenkian (Trabalho original publicado em inglês em 1994).



- Tümay, H. (2016). Reconsidering learning difficulties and misconceptions in chemistry: emergence in chemistry and its implications for chemical education. *Chemistry Education Research and Practice*, 17, 229-245.
- Tversky, B. (2011) Visualizing Thought. *Topics in Cognitive Science*, 3, 499–535.
- Tversky, B., & Suwa, M. (2009). Thinking with sketches. In A. B. Markman & K. L. Wood (Eds.), *Tools for Innovation: The science beyond the practical methods that drive new ideas* (pp. 75-84). Oxford University Press.
- Tytler, R., Prain, V., Aranda, G., Ferguson, J., & Gorur, R. (2020). Drawing to reason and learn in science. *Journal Research in Science Teaching*, 57(2), 209–231.
- Tytler, R., Prain, V., Hubber, P., & Haslam, F. (2013). Reasoning in science through representation. In R. Tytler, V. Prain, P. Hubber, & B. Waldrup (Eds.), *Constructing representations to learn in science* (pp. 83–108). Sense Publishers.
- Underwood, S. M., Reyes-Gastelum, D., & Cooper, M. M. (2016). When do students recognize relationships between molecular structure and properties? A longitudinal comparison of the impact of traditional and transformed curricula. *Chemistry Education Research and Practice*, 17, 365–380.
- van Meter, P. & Garner, J. (2005). The promise and practice of learner-generated drawing: Literature review and synthesis. *Educational Psychology Review*, 17(4), 285–325.
- van Mil M. H. W., Boerwinkel D. J. and Waarlo A. J. (2013). Modelling molecular mechanisms: a framework of scientific reasoning to construct molecular-level explanations for cellular behaviour. *Science Education*, 22(1), 93–118.
- van Mil, M. H. W., Postma, P. A., Boerwinkel, D. J., Klaassen, K., & Waarlo, A. J. (2016). Molecular mechanistic reasoning: Toward bridging the gap between the molecular and cellular levels in life science education. *Science Education* 100, 517–585.
- Wagner, S., Kok, K., & Priemer, B. (2020). Measuring Characteristics of Explanations with Element Maps. *Education Sciences*, 10(36), 1-13.
- Waldrup, B. G., & Prain, V. (2012). Learning from and through representations in science. In B. J. Fraser, K. Tobin, & C. J. McRobbie (Eds.), *International handbook of science education* (2nd ed., pp. 145–155). Springer.
- Wardak, D. (2017). Encapsulating Concepts in Gestures and Drawings During Educational Design Team Meetings. *Mind, Culture, and Activity*, 24(1), 47-66.
- Wilensky, U., & Resnick, M. (1999). Thinking in levels: A dynamic systems approach to making sense of the world. *Journal of Science Education and Technology*, 8(1), 3–19.
- Williams, L. C., Underwood, S. M., Klymkowsky, M. W., & Cooper, M. M. (2015). Are noncovalent interactions an Achilles heel in chemistry education? A comparison of instructional approaches. *Journal of Chemistry Education*, 92, 1979–1987.
- Williamson, V. M., & Abraham, M. R. (1995). The effects of computer animation on the particulate mental models of college chemistry students. *Journal of Research in Science Teaching*, 32, 521-534.

- Wilson, M. (2002). Six views of embodied cognition. *Psychonomic Bulletin & Review*, 9, 625–636.
- Wiser, M., & Smith, C. (2016). How is conceptual change possible? Insights from science education. In D. Barner and A. Baron (Eds.), *Core knowledge and conceptual change* (pp. 29-52). Oxford University Press.
- Woodward, J. (1988). Review of Scientific Explanation and the Causal Structure of the World., by W. Salmon. *Noûs*, 22(2), 322–324.
- Woodward, J. (2003). *Making things happen: A theory of causal explanation*. Oxford University Press.
- Wu, H-K. Krajcik, J., & Soloway, E. (2001). Promoting Understanding of Chemical Representations: Students' Use of a Visualization Tool in the Classroom. *Journal of Research in Science Teaching*, 38(7), 821-842.
- Wu, Y., & Tsai, C. (2011). The effects of different on-line searching activities on high school students' cognitive structures and informal reasoning regarding a socio-scientific issue. *Research in Science Education*, 41(5), 771—785.
- Yeo, J., & Gilbert, J. K. (2014). Constructing a Scientific Explanation: A Narrative Account. *International Journal of Science Education*, 36(11), 1902–1935.
- Zangori, L., & Forbes, C. T. (2014). Scientific Practices in Elementary Classrooms: Third-Grade Students' Scientific Explanations for Seed Structure and Function. *Science Education*, 98(4), 549–742.
- Zhang, J. (1997). The nature of external representations in problem solving. *Cognitive Science*, 21(2), 179–21.
- Zhang, Z. H., & Linn, M. C. (2011). Can generating representations enhance learning with dynamic visualizations? *Journal of Research in Science Teaching*, 48(10), 1177–1198.





**Referência:** Andrade, V., Freire, S. & Baptista, M. (2019). Constructing Scientific Explanations: a System of Analysis for Students' Explanations. *Research in Science Education*, 49, 787–807. <https://doi.org/10.1007/s11165-017-9648-9>.

**Informação journal:**

Journal Citation Reports (Clarivate Analytics): Education & Educational Research

Factor de impacto factor: 5.439 (2020)

Scopus: Social Sciences-Education (Q1): 1,703 SJR (2020)

### Versão dos autores

## Constructing Scientific Explanations: a System of Analysis for Students' Explanations

Vanessa de Andrade<sup>1</sup> | Sofia Freire<sup>1</sup> | Mónica Baptista<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Instituto de Educação da Universidade de Lisboa, PORTUGAL

**Abstract:** This article describes a system of analysis aimed at characterizing students' scientific explanations. Science education literature and reform documents have been highlighting the importance of scientific explanations for students' conceptual understanding and for their understanding of the nature of scientific knowledge. Nevertheless, and despite general agreement regarding the potential of having students construct their own explanations, a consensual notion of scientific explanation has still not been reached. As a result, within science education literature, there are several frameworks defining scientific explanations, with different foci as well as different notions of what accounts as a good explanation. Considering this, and based on a more ample project, we developed a system of analysis to characterize students' explanations. It was conceptualized and developed based on theories and models of scientific explanations, science education literature, and from examples of students' explanations collected by an open-ended questionnaire. With this paper, it is our goal to present the system of analysis, illustrating it with specific examples of students' collected explanations. In addition, we expect to point out its adequacy and utility for analyzing and characterizing students' scientific explanations as well as for tracing their progression.

**Keywords Scientific:** scientific explanations, students' explanations, system of analysis, science education.

## Introduction

Science education literature and several reform documents on science education in Europe and North America have been addressing the importance of involving students in the construction of their own scientific explanations. Two main arguments are the importance of scientific explanations for improving students' conceptual understanding (Braaten and Windschitl 2011; McCain 2015; NRC 2012; Norris et al. 2005; Osborne and Patterson 2011) and the importance of involving students with authentic practices of science for facilitating learning about the nature of scientific knowledge (McCain 2015; NRC 2012).

However, despite general agreement regarding the potential of having students construct their own explanations, a consensual notion of scientific explanations has still not been reached (Braaten and Windschitl 2011; Brigandt 2016; McCain 2015; Osborne and Patterson 2011). As a result, within science education literature, there are several frameworks defining scientific explanations (Rönnebeck et al. 2016). They have different foci as well as different notions of what accounts as a good explanation. Some of these frameworks use explanations as artifacts to assess students' conceptual ideas and students' reasoning (e.g., Jördens et al. 2016; Taber and Watt 2000; Watson et al. 1997; Yan and Talanquer 2015). Other frameworks use explanations and argumentation interchangeably. In such studies (e.g., Berland and Reiser 2009; Ford and Wargo 2012; McNeill et al. 2006; Ruiz-Primo et al. 2010; Songer and Gotwals 2012; Yang and Wang 2014), the explanation serves to support the relationship between evidence and a certain claim, assuming that science explains natural phenomena by gathering evidence and making arguments based on the evidence (Brigandt 2016). Others look into the act of explaining, i.e., to communicate an explanation to others) for exploring students' science communication competence (e.g., Kulgemeyer and Schecker 2013). In addition, few studies focus on explanation as a causal account that describes what happens, based on theoretical ideas of science of how and why it happens. Considering this, more work is still needed to characterize students' scientific explanation in order to be able to support students' learning.

This is the goal of this paper—to present a system of analysis of students' scientific explanations. For that, we will first describe the process of construction and how we used it to categorize students' answers, and second, we will present a categorization of students' answers and their distribution within a sample of 189 eighth grade students. This paper will start with a definition of scientific explanation in order to identify its key characteristics. From the many competing theories and models, we adopted the causal model (Salmon 1984; Strevens 2008; Woodward 2003) and the unification model (Friedman 1974; Kitcher 1989). The first model is useful for its inputs on the underlying causes of phenomena, and the second one provides us with a broad account concerning big science ideas used for making sense of natural phenomenon. Based on the two models, we will present our framework of what represents a good scientific explanation, which was the starting point for developing our system of analysis. We will illustrate the system of analysis using examples from the students' answers. Then, we will use the system of analysis for categorizing students' answers and for describing the distribution of different categories of explanations among the student samples. Lastly, based on the qualitative and quantitative analysis, we will discuss students' difficulties concerning the construction of a scientific explanation and

the adequacy of the system of analysis for characterizing students' scientific explanations and for tracing their progression.

## Defining Scientific Explanation for Science Education

Explanations vary according to the nature of the questions that they intend to answer, to the different purposes they serve, and to the context in which they are provided (Gilbert et al. 1998a, b; Norris et al. 2005; Yeo and Gilbert 2014). Notwithstanding, they do have different usages across different contexts such as everyday life and science, and they serve different purposes, namely, providing requested information or a description, clarifying a point of view or a particular idea, justifying an action or belief, supporting claims, or providing a sequence of causes for an event (Gilbert et al. 1998a, b; Norris et al. 2005).

In science, explanations present with some particular characteristics. First, they tend to be more systematic, deeper, and more accurate than common sense explanations (Woodward 2014). And second, they aim to make sense of a phenomenon taking into consideration other scientific facts or formulating new theories to account for the behavior of a new phenomenon (Osborne and Patterson 2011). Successful scientific explanations increase our understanding of the natural world (Strevens 2008), making sense of why a natural phenomenon occurs, how it comes about, and why it persists (McCain 2015). These characteristics make science explanations central within science practice and, consequently, in science education (Braaten and Windschitl 2011).

Despite the enormous contributions that were made regarding a model of scientific explanations, the concept is still not clear or unproblematic (Woodward 2014). This is not surprising considering the many activities involved in the construction of explanations and the differences that exist in it. When facing these difficulties, many authors pose that rather than looking for one singular theory of explanation, efforts should be conducted to illuminate the virtues of various theories across the different areas of scientific inquiry (Salmon 1984, 1989; Strevens 2008; Woodward 2014).

Philosophers of science have been developing theories and models of scientific explanation, and important contributions were made adding to the discussion about its structure, as well as the strengths and weaknesses of its propositions (Salmon 1989; Woodward 2014). Hempel and Oppenheim (1948) made an earlier attempt to define scientific explanations by presenting a deductive–nomological model. According to the authors, this explanation is successful when the argument is logically deduced from the antecedent facts and laws; that is why, it is considered a deductive model. For instance, we can explain the length of the shadow cast by a flagpole by deducing it from a set of facts (i.e., length of the flagpole and the angle of the sun) together with the relevant laws of optics. However, not only arguments logically deduced from other facts and laws account as explanations, and, in fact, the deductive–nomological model fails to solve some of the problems, namely, it does not respect the asymmetrical relationship of the explanation. Actually, this model implies that the explanation should be a symmetrical relationship, because, in fact, we cannot explain the length of the flagpole by the length of its shadow but only deductively infer its height. Also, there are some other problems that this model does not account for, which challenges the logical and empirical emphasis of the Hempel

and Oppenheimer model and require other models; for instance, models that pay attention to the consequences, functions, and purposes of phenomena (Kitcher 1989).

Over the last decades, new perspectives have arisen, namely, constructivist perspectives, which started challenging the logical and empirical emphasis of the Hempel and Oppenheimer model. It is not our goal to explore that discussion here but rather to highlight some aspects that we consider relevant for our framework. More recent models of explanations tend to fall into one of two broad models: the causal explanation model and the unification model. The causal explanation model focuses on the nature of explanations stressing the importance of identifying the underlying causes beyond the phenomenon in order to understand how and why a particular phenomenon behaves like it does (Salmon 1984; Strevens 2008; Woodward 2003). The unification model relies on the big ideas of science to provide a unified framework to understand a wide range of related phenomena (Friedman 1974; Kitcher 1989).

Consistent with the causal explanation model (Salmon 1984; Strevens 2008; Woodward 2003), events can only be explained by tracing the story of their causes. Although deductive arguments may also be involved, the causal accounts rely on the relevant causes that produce the phenomenon and on the relationship between them (Strevens 2008). Referring back to the example of the flagpole, the length of the shadow is not a relevant cause that explains the height of the flagpole. One critical issue in a causal model is that an explanation does not intend to show that the phenomenon being explained is correct, but rather to trace its causal story (Brigandt 2016). For example, we explain how a chemical reaction occurs by specifying the nature and the properties of all the entities involved and by describing the events in which they participate (Thagard 2007). Although this may seem to be an unproblematic idea, deciding on which causal factors and the type of causal relations account as propositions, it is not entirely straightforward. Much of the discussion around the notion of causality gave rise to several different theories/models of causation (Salmon 1984; Strevens 2008; Thagard 2007; Woodward 2003). Despite this discussion, the truth is that many of the scientific explanations are causal (Salmon 1984; Strevens 2008) and for decades, the causal explanation models have enjoyed great popularity in the science and philosophy of science communities under the argument that causal facts are a critical part of the natural phenomena (Salmon 1984; Woodward 2003).

The unification model has its roots in the work of Friedman (1974) who maintained that a model of explanations must tell how explanations promote understanding. Also, in such a model, the understanding increases as several distinct natural phenomena are linked by big ideas. This model emerges from the idea that science seeks to explain natural phenomena through building comprehensive ideas that connect various aspects of the universe. According to Kitcher (1989), who later developed this model, the explanatory force of an account lies in the potential of its theoretical framework to unify seemingly unrelated phenomena and to organize knowledge within a comprehensive, coherent explanatory framework (for instance, kinetic molecular theory for understanding why the water in a puddle evaporates and why a ball will deflate at low temperatures). In other words, the same assumption is used again and again to derive different facts, reducing the arbitrariness of the phenomenon (Woodward 2003).

Neither of these models is mutually exclusive. They can be used together: the unification model provides the theoretical groundwork for the explanation and the causal explanation model provides the sequence of the information that tells the causal story of the phenomenon through a coherent and progressive way. Both models are of particular importance for science education. First, the unification model seeks to explain natural phenomena with as few scientific ideas as possible. One of the goals of science education is to provide students with the big ideas of science that can be used to grasp the essentials of diverse phenomena that apply globally to phenomena, not just locally (Braaten and Windschitl 2011; Brewer et al. 1998). This perspective, widely accepted and welcomed in science education reforms (Harlen 2015; NCR 2012; Osborne and Dillon 2008), recognizes that big ideas have "explanatory power in relation to a large number of objects, events, and phenomena that are encountered by students in their lives during and after their school years" (Harlen 2015, p. 14) and that they can be used to construct new scientific explanations.

Second, while involved in identifying a causal explanation for a phenomenon, students are prompted to infer about the underlying causes and to discover the structural connections of phenomena in the world. In doing so, students develop a deeper understanding of natural phenomena rather than a superficial generalization from direct observations (Grotzer 2003; Windschitl et al. 2008). Furthermore, constructing explanations that require causal reasoning positively contributes to the understanding of the nature of explanations and to the idea that explanations in science are tentative accounts for making sense of natural phenomena (Braaten and Windschitl 2011; Grotzer 2003; Perkins and Grotzer 2005; Ohlsson 2002).

Therefore, both models not only provide a good understanding of the logical structure of scientific explanations, but they also positively align with important aims of science education. Indeed, a number of frameworks about students' scientific explanations were informed by these models (e.g., Braaten and Windschitl 2011; Brewer et al. 1998; Tang 2016). In fact, our idea of scientific explanation has much in common with Braaten and Windschitl's (2011) framework that states an explanation involves the construction of causal stories that makes sense of phenomena by describing what happens and using the big ideas of science to theorize about how and why it happens. As expected, students' explanations will be simpler than scientific explanations. Despite this, if students can learn the logical structure of scientific explanations, they can engage in scientific practices of constructing better explanations; consequently, these models are of particular importance for science education (Braaten and Windschitl 2011). However, we feel that there is also a need for a system of analysis that covers in greater detail the features of students' explanations—identifying their needs and introducing the representational levels—and is fundamental to explaining natural phenomena related to the particulate nature of matter and areas where students experience difficulties (Taber 2013). In the next section, we will present the development of our framework for conceptualizing the quality of scientific explanations that builds from both the causal models and the unification models.

## Key Elements of a Good Explanation

In the previous section, we defined scientific explanation and conceptualized its logical structure according to two models from the Philosophy of Science. In this section, we will conceptualize a good scientific explanation, based on the framework of Braaten and Windschitl (2011).

The construction of scientific explanations requires that students provide a conceptual framework for the observed phenomenon, to identify the relevant information, to infer on the unobservable world, to grasp underlying causes, and to establish a logical connection between these causes. In addition, it requires students to explore and use the big ideas of science for understanding how and why a particular phenomenon occurs. In order to be considered a good scientific explanation, an account has to present four dimensions: relevance, conceptual framework, causality, and the appropriate level of representation. Students often face difficulties with each one of these dimensions (Faria et al. 2014; Grotzer 2003; Kang et al. 2014; Zangori et al. 2015). Thus, these dimensions are critical issues that must be taken into account in assessing students' explanations and their evolution in the construction of better explanations. Below, we will describe the four dimensions, their role in the construction of a good scientific explanation, and the difficulties faced by the students.

First, the information presented in good scientific explanations must be relevant to the phenomenon. Relevance is an essential feature of scientific explanations in the causal model of explanation (e.g., Salmon 1984, 1989; Strevens 2008). According to these authors, only the relevant information must be considered. Other authors, such as Brewer et al. (1998), Grotzer's (2003), and Keil's (2006) state that from an early age, children are able to provide very complete accounts to explain particular events. Nevertheless, student's explanations are frequently not appropriate or are provided at a poor level of detail (Keil 2006) because students are unable to recognize which key aspects of the phenomenon are relevant and which ones must be isolated and highlighted (Faria et al. 2014; Russ et al. 2008). Since it is not straightforward for students to identify relevant information, yet relevance is a central issue of a well-succeeded explanation, we consider that a good explanation presents relevant information.

Second, an explanation must provide a conceptual framework based on the theoretical ideas of science. According to the unification model, an essential feature of scientific explanations is promoting a global understanding of the natural phenomena rather than a locally restricted understanding (Friedman 1974; Kitcher 1989). However, several studies (e.g., Ehrlén 2009; Faria et al. 2014; Taber and García-Franco 2010; Zangori et al. 2015) show that students frequently focus their attention on the details, have difficulty reducing apparently disconnected events into one global idea and determining the intelligibility of the phenomena<sup>^</sup> (Brewer et al. 1998, p. 134). In fact, learning the science concepts does not necessarily imply that one can use them for understanding and explaining the natural phenomena. Rather, this requires conceptual understanding: the ability to use the ideas of science in building an explanation (McCain 2015; EC 2007). As such, looking at the ability of students to provide a conceptual explanatory framework was considered an important criterion for the analysis of the nature of students' constructed explanations.



Third, an explanation must trace the causal story of the phenomenon. We consider good explanation accounts those that present logical and coherent causal stories, in which the phenomenon is attributed to a set of underlying processes. As we previously discussed, a central idea in causal models is that an explanation is not a list of events preceding the phenomenon, rather in order to have explanatory force, the phenomenon has to be attributed to these events (Salmon 1984, 1989; Strevens 2008; Woodward 2003). Moreover, as Woodward (2003) argues, the virtues of a causal explanatory account lie in its depth as the more in-depth explanations are good causal stories about the ways in which the phenomenon happened. Depending on the phenomenon under explanation, and the context in which it is produced, a causal story can consist of simple linear relation between contiguous events or more complex relations, combining various causal factors interacting with each other (Grotzer 2003). Whereas almost all explanations of natural phenomena, even everyday explanations, consist of a complex chains of relations (Keil 2006; Ohlsson 2002), which requires one to infer intermediate causes, these complex chains of relations might be non-obvious (Grotzer 2003; Perkins and Grotzer 2005). Therefore, helping students uncover the causal relations behind an observed phenomenon is critical for making sense of and scientifically understanding it. Nevertheless, students frequently struggle when presenting a causal story in which events result from interactions among multiple components (Grotzer 2003; Perkins and Grotzer 2005). Studies (e.g., Faria et al. 2014; Kang et al. 2014; Parnafes 2012; Zangori et al. 2015) show that students' explanations often lack logic and consistency. In the presence of unfamiliar contexts, students tend to reduce the complexity of the information, focusing their attention on a restricted set of causes and ignoring other relevant ones. It is common that students complete their causal schemes with common sense ideas that they perceive form a compelling consistent sequence (Taber and García-Franco 2010). Finally, students tend to simplify their reasoning, forming simple and linear causal sequences where each cause is a consequence of another contiguous one, and where effects are felt in one direction only (Grotzer 2003; Perkins and Grotzer 2005). As a result, another key element to a good explanation is telling a causal story of the phenomena.

Fourth, a good causal story requires an appropriate level of representation (Strevens 2008). Most of the time, grasping the causal stories of natural phenomena involves moving beyond the surface and making inferences about abstract entities and processes (Grotzer 2003; Taber and García-Franco 2010; Yeo and Gilbert 2014; Windschitl et al. 2008). For instance, explaining how and why a breeze on a hot day makes us cooler (Strevens 2008) involves specifying the nature and the properties of the entities involved and describing its behavior and the events in which they participate at two distant but related levels of representation: the macroscopic—the level of the observable and tangible events—and the submicroscopic—the level of the unobservable and theoretical entities (Taber 2013; Talanquer 2011). Studies have shown that students have great difficulty conceptualizing phenomena in terms of each level and considering the connections between them. For example, Prain et al. (2009) reported students' difficulties in transferring macroscopic properties, such as expansion of heating, to the submicroscopic domain, such as discrete particles with empty space between them, moving faster or slower. The difficulties with these levels hinder students' ability to make sense of the observable phenomenon (Cheng and Brown 2015; Prain et al. 2009; Taber and García-Franco 2010; Yeo and Gilbert 2014) and to explore the underlying causes, resulting in fragmented explanations (Grotzer 2003).



Therefore, using an adequate level of representation for explaining phenomena is considered one more key element of a good explanation.

## Context and Data Collection

This particular study is part of a broader research project, whose goals are to know how students construct scientific explanations about chemical phenomena and to understand how they can be supported to improve their explanations. In the initial stage of this project, we applied a questionnaire to the participating students where they were required to construct explanations of natural phenomena. The purpose of the questionnaire was to characterize the quality of students' explanations before they were involved in a learning sequence based on inquiry activities in which they were explicitly engaged in the construction of scientific explanations about observed phenomena (the second stage) and in order to know whether the quality of their explanations improved.

The questionnaire consisted of four open-ended questions, which required that students constructed an explanation concerning a natural phenomenon that they observe in their everyday life or that they had previously explored in science lessons. Before the application of the questionnaire, we were assured that all students had already been taught the contents required, so that all had a fair chance to construct a good scientific explanation based on what they already learned in their physics and chemistry classes. Phenomena under explanation were the mixture of liquids with different densities (question 1), the dissolution of sugar in water (question 2), the condensation of water on the surface of a cold can (question 3), and the thermal expansion of a gas (question 4).

The questionnaire was undertaken by 189 students (97 female and 89 male) in eighth grade physics and chemistry classes. Students were studying in two different Portuguese public schools following the elementary physics and chemistry curriculum, which in Portugal consists of the last 3 years of the third cycle of basic education, from seventh to ninth grade (12—15 years). Two teachers were involved in the project: one of them has a Ph.D. in science education and 14 years of teaching practice; the other is a Ph.D. student in the same field, with 18 years of teaching practice.

The questionnaire was applied by the teachers in the presence of the first author, during a regular 45-min lesson. Both teachers followed the same procedure: first, they discussed with the students what to explain means, as in science classrooms, terms such as to describe, to explain, to justify, etc. are often used interchangeably (Braaten and Windschitl 2011; Horwood 1988), and then they defined what they considered a good explanation. Afterwards, teachers constructed, together with the whole class, a scientific explanation for the phenomenon: the diffusion of floral oil scent around a room. In this joint activity, students were explicitly prompted to describe what they observe/sense during the phenomenon; include what they think may have happened, but that they could not observe/sense; and identify the scientific ideas that they think would apply to the phenomenon; identify how the things that they cannot observe/sense are important to produce what they observed/sensed. After constructing the explanation for the phenomenon jointly, the students answered the questionnaire individually. Teachers provided occasional feedback and only for clarifying the meaning of some words or

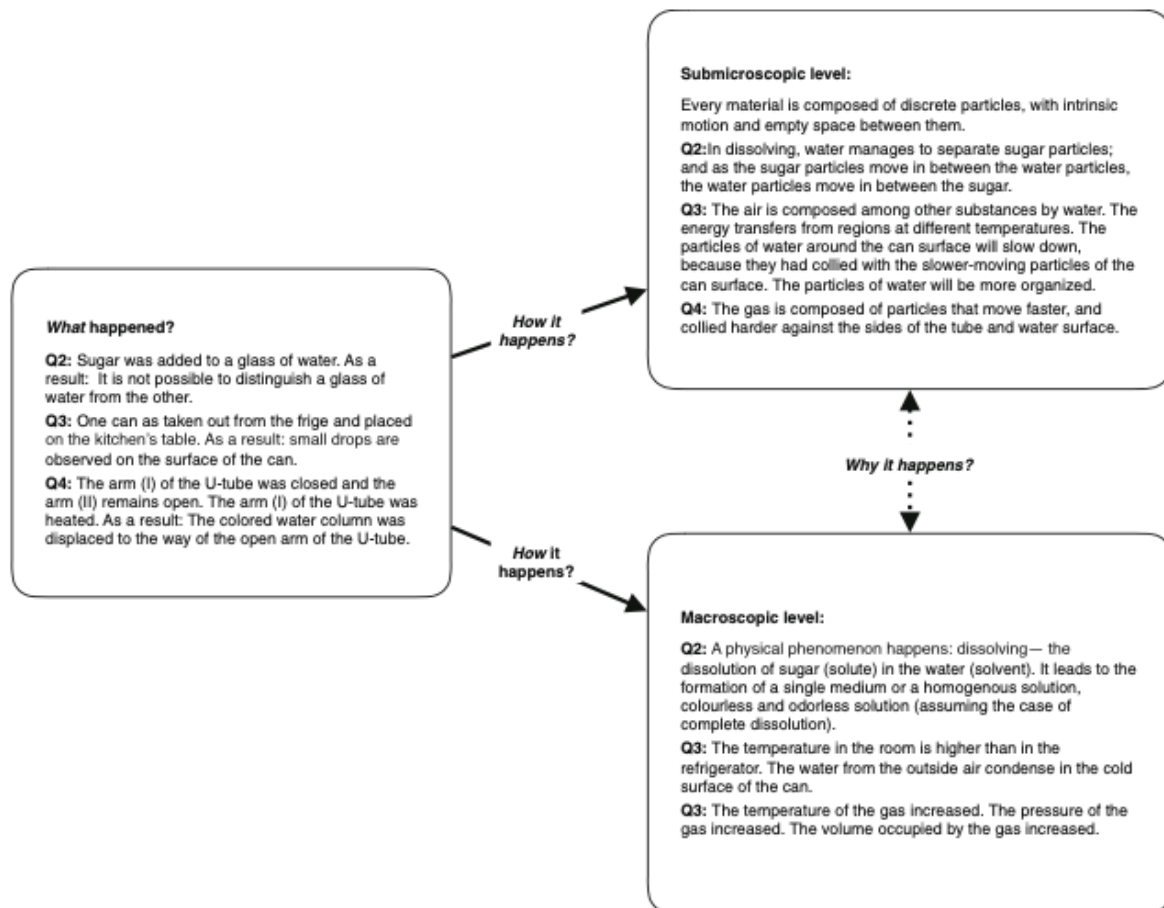
sentences. The first author observed all of the classes in which the questionnaire was applied, assuming a role of non-interventionist observer (Cohen et al. 2007).

## **Data Analysis**

The main goals of this paper are as follows: first, to describe the process of construction of the system analysis and to illustrate how we used it to categorize students' answers; second, to discuss the adequacy and usefulness of the system in analyzing students' scientific explanations. For that, we used both qualitative and quantitative analyses. Qualitative analysis for categorizing students' answers and quantitative analysis to explore the consistency of the distribution of students' answers with the literature.

## **Qualitative Analysis**

For the purpose of this study, we selected questions 2, 3, and 4. Question 1 was excluded from analysis, as most students presented an explanation not aligned with what had been required of them. In order to construct the questionnaire, we first reviewed the learning goals of the Portuguese elementary science curriculum of physics and chemistry (MEC 2013) to determine what target scientific concepts related to the phenomena should be considered in students' explanations. We then outlined a hypothetical good scientific explanation, considering students' curricular level and the framework of scientific explanation previously developed. Figure 1 illustrates for each one of the three questions the target scientific concepts, causal links, and representational levels that were considered.



**Fig. 1** The scheme of the scientific explanations for the three phenomena under analysis

Second, we constructed a system of analysis for coding students' answers. Initially, the first author closely read all of the students' answers. This initial analysis followed a constant comparison method (Strauss and Corbin 1998) in order to determine whether there were apparent patterns in students' constructed explanations. Each one of the collected answers was carefully read, compared, and tentatively assigned into groups of explanations based on its similar characteristics. The answers that were difficult to classify following the first reading were placed in a separate group and discussed with the other two authors. After a consensus was reached, these answers were assigned to one of the previous groups. The initial emergent categories were non-explanation, pseudo-explanation, and explanation. In order to distinguish non-explanations from potential explanations (at this phase, either pseudo-explanation or explanation), we asked three questions:

1. Is the information presented in the students' explanation relevant to the phenomenon?
2. Do students use a conceptual framework to guide their explanations?
3. Are the students' accounts more than reformulations or restatements of what was previously exposed and provide additional insights, enabling a possible understanding of the phenomenon?

Every account that did not positively answer any one of the above questions was classified as non-explanations. With all non-explanations assigned to one of the groups, we then turned our attention to the accounts evidencing explanatory potential. At that point, we asked whether students' answers described what happens (i.e., pseudo-explanation) or, otherwise, account for how and why the phenomenon occurs (i.e., explanations). Pseudo-explanation was considered accounts that described the observed events yet paid little attention to the specific entities and the underlying processes that produced the phenomenon and that presented a poor causal scheme. Explanations were considered accounts that presented logical and coherent causal stories that relied on a conceptual framework, in which observed events are attributed to the underlying processes.

When all of the students' answers were classified into one of the three previous categories, a new closer re-reading of all of the answers was conducted. This process led us to a deeper analysis, in which we recognized particular characteristics within each one of the previous categories. This closer analysis, informed by the framework of a good explanation previously presented, allowed us to distinguish these particular characteristics within the students' explanations. Based on this, a second analysis was done with respect to the nature of causal relations and the representational level of explanation.

Regarding the nature of causal relations, four characteristics for distinguishing the nature of causal relations presented by the students were considered:

1. Students describe events in terms of patterns and surface features and do not make any suggestions of the processes involved; these descriptions are considered sufficient for explaining the phenomenon.
2. Students make regular associations of events or properties, with no close connection; the phenomenon is seen as a result of a single and determinant cause.
3. Students tell a simple causal story; this story is presented as a sequence of immediate causes and effects following only one direction; the phenomenon is seen as a result of many causes that are directly related to each other, without considering possible interconnections.
4. Students tell a complex causal story, coordinating multiple relations and considering possible mutual causes, conditions, or constraints.

In addition, we also considered the representational level of the explanations: (1) students' answers present a conceptualization at the macroscopic level, i.e., answers describe the observed events considering its macroscopic properties, namely, temperature, volume, homogeneity, etc. and (2) students' answers present a conceptualization at the submicroscopic level, inferring theoretical entities and underlying processes that are too small to be seen by the naked eye.

Based on both dimensions, we refined the previous categories pseudo-explanation and explanation. The category pseudo-explanation was further divided in two categories: the descriptive explanations (which includes two subcategories: macro and mix descriptions) and the associative explanations. The category explanation was split into the subcategories simple and complex explanations. Based on these categories, a system of analysis was constructed (see Fig. 2).

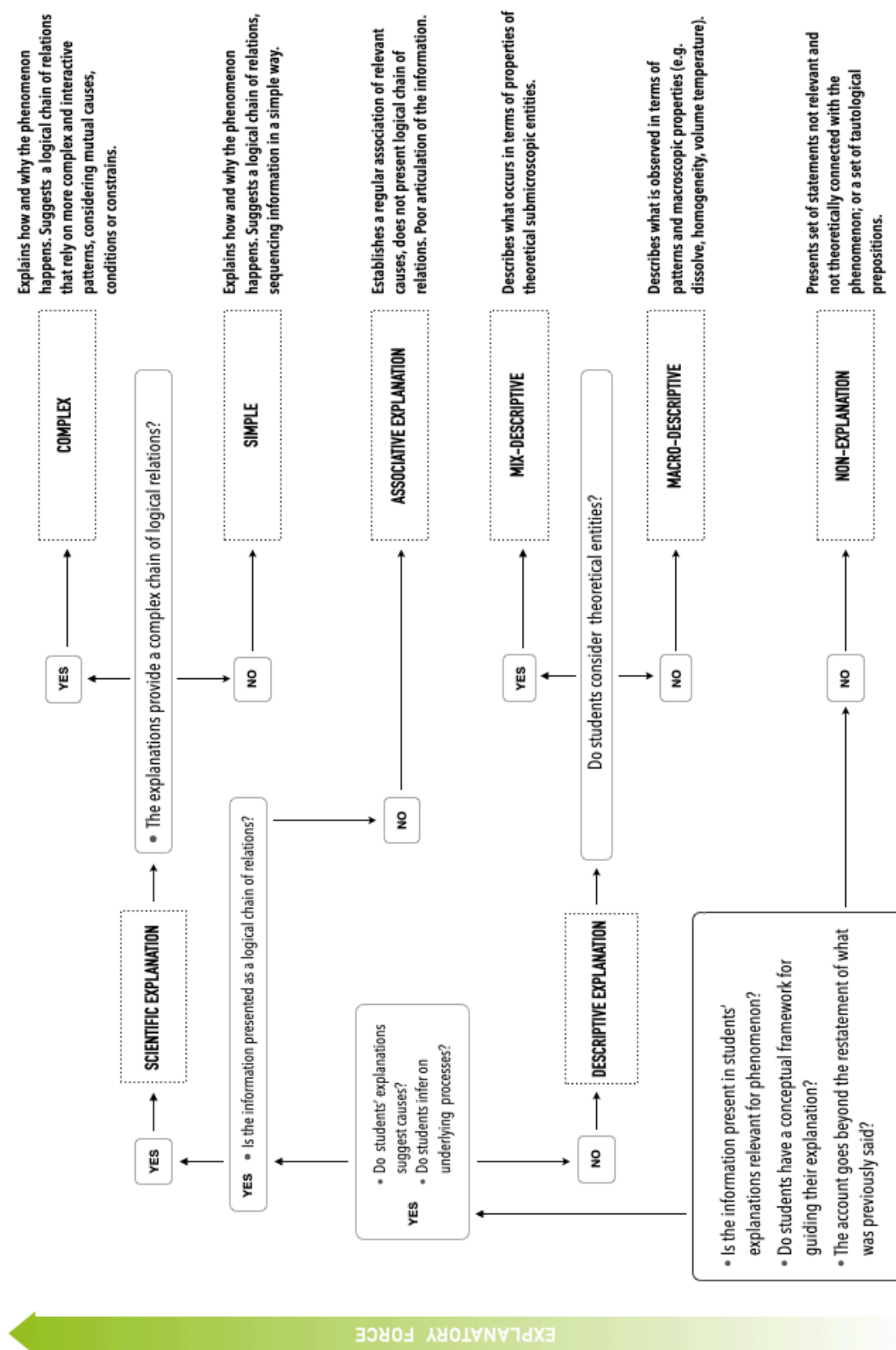


Fig. 2 The system of analysis for categorising students' explanations

After constructing the system of analysis, the first author used it to code again all of the students' answers. In order to ensure the agreement among the three authors on which answer would be code in which categories, we considered the degree of agreement in the coding answers by calculating the ratio between the number of actual agreements and the number of possible agreements (Cohen et al. 2007). The second and third author used the system of analysis for classifying 10% of the students' answers. The answers were randomly and independently assigned to each one of the authors. A summary of the inter-rater agreement scores between the first and the second and between the first and the third author is given in Table 1.

**Table 1** Inter-rater agreement for the system of analysis

| Coders                   | Inter-rater agreement |            |            |
|--------------------------|-----------------------|------------|------------|
|                          | Coding Question 2     | Question 3 | Question 4 |
| First and second authors | 0.83                  | 0.84       | 0.81       |
| First and third authors  | 0.87                  | 0.86       | 0.85       |

After the second and third authors had classified the answers independently, the three authors met to compare and discuss their individual analyses and to refine minor aspects of the system of analysis (e.g., some terms and language usage). The inter-rater differences were mainly encountered when answers were difficult to understand due to language or grammar usage. In these circumstances, differences were resolved through a discussion between the three authors that led to mutual agreement among them.

## Quantitative Analysis

In order to have a global image concerning the students' answers in all eight of the classes, we did a descriptive analysis of the answers. Despite collecting 189 student questionnaires, each one of the questions had a diverging number of valid answers (question 2—88,4% of the students' answers were considered valid and were analyzed; questions 3—81.4% of valid answers and question 4—74.6% of valid answers); non-valid answers were answers left blank and non-sense answers. In addition, we calculated the correlation of students' answers using Spearman's rank correlation coefficient and we compared the distribution of the categories of analysis in each question using Friedman non-parametric test for related samples.

## Results

### Qualitative Analysis of Students' Explanations

#### *Non-explanations*

For an account to be considered a potential explanation, it has to use relevant information, i.e., the events, entities, and its properties have to be relevant in producing the observed phenomenon. In addition, it has to present a conceptual framework based on major

theories of science, instead of one framework that can only be applied locally to the observed events. Finally, the account has to go beyond the posed information proposing new insights, i.e., an account that goes beyond tautological ideas. Students' answers that do not positively respond to one of these claims were considered non-explanations. The following are examples of non-explanations:

*As sugar melts in water and as water is denser than the sugar, we cannot see it by the naked eye (Student ACA20—Question 2).*

*As he took the can from the fridge, the can still had some ice in it. Now, as the can was in an environment with a higher temperature, the ice melted (Student ACA08—Question 3).*

*The air column moved to the end (II), because after heating up [the U-shaped tube], the portion of the air contained a lot of carbon dioxide (Student ACB12—Question 4).*

In each of the above accounts, students describe events such as "the portion of the air contained a lot of carbon dioxide," "sugar melts in water (...) water is denser," or "the can still had some ice in it (...) the ice melted." These events are not relevant to the phenomenon under explanation. Moreover, each of the above accounts also failed to present a conceptual framework based on canonical scientific ideas, namely, "a gas expands when it is heated," "the dissolution of sugar in water," or "the water from outside air condenses when it comes in contact with a cold surface." Since a conceptual core is absent, the framework's coherence is limited.

Accounts that indicate tautological ideas were also classified as non-explanations, such as the following:

*As the hot air is at the extremity (I) the colored liquid goes into the extremity (II). (Student AIB02—Question 4)*

*As both are equal. Despite one having sugar, it is impossible to distinguish one from another. (Student ACE14—Question 2).*

Each of the above examples evidence just a reformulation of what was previously stated, without providing any new insight. All of the information provided in each of the two instances had been presented in the legend of the texts or photos illustrating the question under analysis. Students drew upon this information to present an account, but they have not identified causes for the observed results. Accounts like these reflect tautological reasoning, relying on superficial ideas that have no explanatory force and were classified as non-explanations.

### ***Descriptive Explanations***

Descriptive explanations are those accounts that simply describe events preceding the phenomenon and do not discuss how these events are related to each other in bringing out the phenomenon. These descriptive explanations were classified as macro or mix descriptive, considering its level of representation.



### Macro-Descriptive

Macro-descriptive explanations include answers based on common observations and description of patterns that merely picture the macroscopic properties or functions of the entities. The following are some instances of these types of explanations:

*[The colored water column moves to the open side (II)] because the portion of the air at the end (I) increased its pressure and pushed the liquid to the "free" part of the tube (Student ACA06—Question 4).*

*Mary cannot distinguish, as when one mixes water and sugar, it results in a homogeneous mixture. Homogeneous means that one cannot see the solution (Student ACE13—Question 2).*

*As sugar is dissolved in water, there is no evidence that the glass containing the water in which sugar is dissolved is the glass containing sugar (Student ACA06—Question 2). As the can was cold, when it contacted the air, the air condensed. (Student AIB12—Question 3).*

In each of the above instances, relevant properties were identified for the phenomenon under explanation, namely, "the pressure increased," "the formation of homogeneous solution," "sugar dissolves in water," or "the condensation of the air," which were perceived as sufficient to explain the observed events. However, the identified properties remain at the macroscopic level of representation; these examples do not recognize that every material is composed of submicroscopic particles, with intrinsic motion. Each of the above samples focuses on what happened without grasping the causes for how and why it happened. For instance, students explained the displacement of the water column as a direct result of the increase in pressure, or that condensation occurs as a result of the contact with a "cooler surface," without disclosing the process by which these events came about. In the other examples, students recognized that sugar dissolves in water, forming a single medium, although no further information was presented about why the dissolving occurs. Therefore, these accounts were classified as macro-descriptive.

### Mix-Descriptive

The mix-descriptive explanations include those answers that identify relevant entities that participate in the phenomenon and its properties even though the students do not use these ideas for inferring on the underlying processes, as well as on the causes and effects. Therefore, the accounts included in this category essentially remain descriptive. The following are some examples of such explanations:

*Mary cannot distinguish, without tasting, which glass contains only water from the one that contains water and sugar, as the sugar dissolved in the water. So, she cannot distinguish between the two, since we cannot see it with the naked eye. However, we know that the water and sugar particles are there (Student ACC22—Question 2).*

*Because the air particles dispersed, i.e., because they occupied more space (Student AIB15—Question 4).*



*As air particles were attracted to the can, as the can was cold (Student ACA17—Question 3).*

Each of these accounts addresses relevant properties of the nature of entities involved, for instance, "every material is composed of discrete particles," "that we cannot see," "when heating up something," "particles (...) occupied more space," or "come together" if "something is cooler." Nevertheless, students did not use these ideas to disclose how the invoked entities took part in the underlying processes in order to produce the observed phenomenon. Each of the above instances focuses on predetermined theoretical ideas that the students merely asserted as facts. The phenomenon was approached from the point of view of a result, and these ideas are seen as sufficient enough to explain the phenomenon, which compromises the explanatory force of the students' accounts.

Additionally although the students recognized, in the first two examples, the submicroscopic level, they conceptualized it in terms of macroscopic ideas, for example, "they cannot be seen with the naked eye" or "they occupied more space." This was also a criterion of *mix-descriptive explanations*.

### **Associative Explanations**

Associative explanations are those accounts that associate pieces of information yet fail to establish how the information is related, as can be appreciated in the following examples:

*Because sugar particles have spread inside the water particles, occupying their empty spaces. So, there is no sugar on the bottom of the glass (Student ACB20—Question 2).*

*Around the can, there were water particles. The temperature of the fridge and the air outside the fridge was different. While Sara was talking with her friend Marta, those water particles around the can become water drops due to the difference in temperature (Student AIB03—Question 3).*

*By increasing the temperature, the pressure of particles also increases. By heating up the air, this exerts a greater pressure on the water particles, causing it to move more towards the end (II) of the tube (Student AIC23—Question 4).*

In the first example, the event "sugar particles occupied the empty spaces between the water particles" was seen as an isolated cause for dissolving, without disclosing other aspects of the nature of entities that led to this event, for instance, "particles have intrinsic motion." Similarly, in the last example, the pressure was seen as a direct result from an increase in temperature; the student actually repeats this idea twice. Apparently, the student does not recognize the intermediate events in which the entities participate, namely, that as temperature increases, particles' motion increases and collide more with each other, causing the pressure to increase. Although associations between the nature of the entities and its behavior were established, and insights about how the events came about were given, the causal story of the phenomenon remained fragmented. The second example goes further in explaining the condensation process that occurs on the surface of a cold can. The student did infer relevant underlying causes; for instance, differences in

temperature can cause changes in the physical states of matter. Nevertheless, many gaps remain among the events in which the entities participate and the consequences of these events. For example, how does the difference in temperature cause "a change in the physical state of the water around the can." In general, these answers show evidence of an association of relevant properties, yet the phenomenon is still attributed to single causal isolated relation. In these accounts, students tend to over-generalize the causes involved constraining its explanatory force.

## **Explanations**

As asserted before, for an account to be considered an explanation, it has to present relevant information and a conceptual framework, and it must trace the full causal story for how and why the phenomenon happens at the appropriate level of representation. Most of the time tracing such a story requires establishing complex causal chains and identifying interactive relationships among mutual events, constraints, or conditions. These explanations were classified as simple or complex explanations depending on if a sequence chain of contiguous cause-effect was presented or if a complex chain of interactions between several dynamic events interacted with each other was presented.

### *Simple Explanations*

The following answers are instances of the linear-causal explanations:

*Mary cannot distinguish, as after a period of time the sugar dissolved in the water. As sugar particles are always in motion and as there are empty spaces, sugar particles end up dissolving in the water. As a result, we cannot see the sugar in the water. That is the reason why Mary cannot distinguish one glass from the other glass*  
(Student ACB16— Question 2).

*Because when the end (I) was being heated, the particles of the air became more agitated when they felt that the temperature was rising; the particles of air were pressed and so they started coming down causing it to go towards the end (II)*  
(Student ACB18— Question 4).

Each one of the above accounts was presented at the submicroscopic level, invoking relevant entities and its properties, and inferring on processes in which they are involved. In the first example, for instance, "water particles with intrinsic motion and empty spaces dissolves sugar particles" or, in the second instance, "temperature was rising," "particles became more agitated," causing "more pressure." Moreover, in the above accounts, the observed phenomenon was attributed to a sequence of immediate relations, following a linear path with no interactive relations between more than one event. For instance, in the first example, the sequence of events that takes place in the process of dissolving is due to one single entity "water" and the events in which it participates. Similarly, in the second example, to fully trace the causal story of this particular phenomenon, some conditions that interplay with the sequence of events must be considered, for instance: the tube is closed at the end I and open at the end II. Since each of the above answers lacked this feature, they were considered simple explanations.

Finally, some of the accounts included here suggest informal language. In the second example, for instance, the student refers to: "the particles of the air (...) felt that the temperature was rising." This account shows evidence of relevant information about the underlying processes and presents causal relations between the many events; however, considering that our aim is to characterize the nature of the students' explanation, this type of account was also considered a simple explanation.

### *Complex Explanations*

The following answers are instances of interaction-causal explanations:

*The column of air was displaced, because by closing and heating the end (I), the particles' agitation progressively increased and by hitting at each other and the walls of the tube, they created pressure, making the water move (Student ACA21—Question 4).*

*Maria cannot distinguish one glass from the other as sugar dissolve in water. As all particles are in constant motion, both corpuscles mixture with each other and occupy the empty spaces. As a result is impossible to see which glass contains sugar (Student ACE04—Question 2).*

Each of the above answers represents instances of explanations that enable one to trace the full causal story of the observed phenomenon. To be a complex explanation, and despite the many features further considered, an account should reflect a logical causal chain that relies on complex interactive patterns, considering the several events and its conditions or constraints. Indeed, each of the above accounts reflects the interplay between events, for example, the first answer states, "because by closing and heating the end (I)," and similarly, the second example points out, "This will displace the water, because the other end is uncovered." The second example reflects the mutual processes of dissolving: the solvent particles move in between the solute particles and the solute particles move in between the solvent particles.

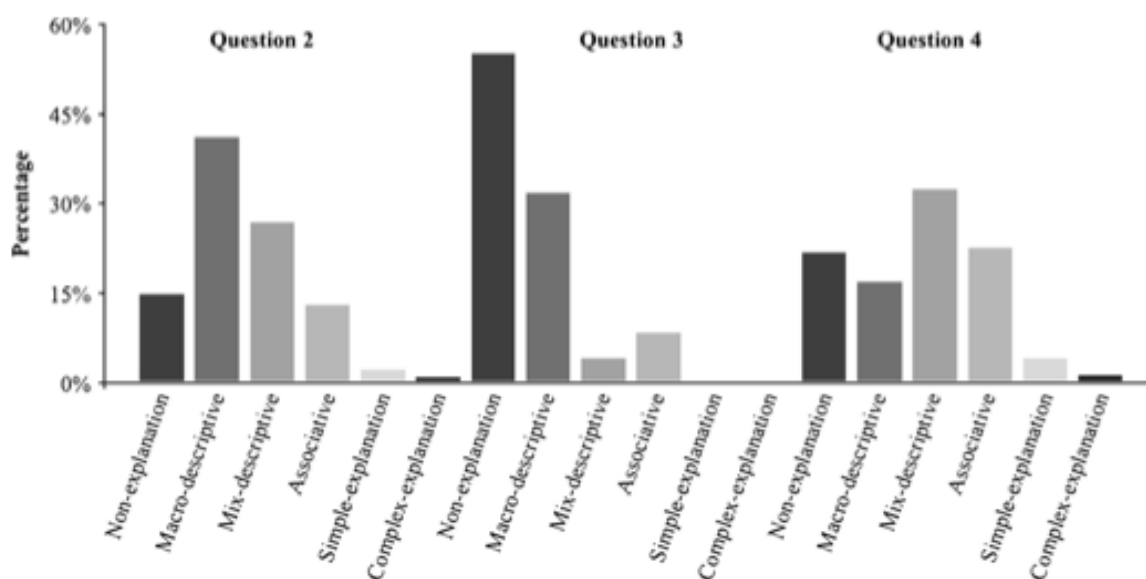
Each of the above accounts presents many features of an explanation: only relevant information is invoked, a conceptual framework that goes beyond the situational context is presented, the observed events at the macroscopic level are conceptualized regarding its properties and related in a causal manner, and the interconnected relation with the inferred processes at the submicroscopic level is highlighted. These accounts are close to our target explanation. They describe what happened and provide causal stories theorizing about how and why the phenomenon happened in that way, and in doing so, they reflect a process of making sense about the nature of the observed phenomenon, exhausting the many possible "whys".

## **Quantitative Analysis of Students' Explanations**

Quantitative analysis of the explanations reveals that the quality of students' answers differed depending on the question asked and that this difference was statistically significant for a confidence level of 95% (Friedman test;  $\chi^2(2) = 58,601$ ;  $p = 0.000$ ). In

addition, answers for each questions are not correlated ( $R_{s\ Q2-Q3} = 0,237$ ;  $R_{s\ Q2-Q4} = 0,350$ ;  $R_{s\ Q3-Q4} = 0,356$ ).

Figure 3 represents the distributions of students' scientific explanations for the three questions under analysis across levels of explanation. Concerning question 3, in particular, most of the answers were non-explanations (55,2% of all the answers for this question). This contrasts with the percentage of non-explanations for questions 2 and 4 (respectively, 15 and 22%). Furthermore, for question 3, students did not provide any explanation (either simple or complex). This contrasts with answers to questions 2 and 4 (simple explanation, respectively 2.4 and 4.3%; and complex explanation, respectively 1.2 and 1.4%).



**Fig. 3** Distribution of students' scientific explanations across levels of explanation

For all three questions, students tended to present descriptive accounts (68.3% descriptive explanations for question 2, 36.2% for question 3, and 49.6% for question 4). However, concerning questions 2 and 3, the descriptions mostly represented the phenomenon at the macroscopic level (respectively, 60.5 and 88.1% of descriptive explanations), while in question 4, most answers are mix-descriptions (65.7% of descriptive explanations).

## Discussion and Conclusions

Although scientific explanations play a central role in science education literature, research in this area has been endorsed by different conceptual frameworks considering different ideas of what constitutes a good scientific explanation, and within this, many different instruments of analysis have been proposed. Among the many proposals in the literature, explanations tend to be treated within two perspectives: (1) to assess students' conceptual ideas and students' reasoning regarding a particular scientific topic; in these cases, the quality of the explanation is assessed by considering scientific correctness of exposed ideas; the focus is on scientific content; (2) as a process of constructing and defending arguments; in these cases, the explanation is assessed by considering the use of appropriate and

sufficient evidence and the strength of the arguments on why the evidence justifies the claim. Therefore, we find a gap in the literature related to the analysis of students' scientific explanations, specifically focused on conceptual framework, relevance, nature of causal relations, and level of representation. Considering that the construction of scientific explanations requires students to use "big ideas" of science for understanding how and why a particular phenomenon occurs, to infer on the unobservable world and to establish logical causal relations presented at an appropriate level of representation, we developed a system of analysis that takes into consideration all these elements.

This paper describes this system of analysis and how it was used to categorize students' explanations. Results show that very few students presented a scientific explanation with a higher level of explanatory force, i.e., one that tells the causal story of how and why one specific phenomenon occurs, using the big ideas of science and establishing complex systems of causal relations. Indeed, the majority of the students' answers were accounts that described what happened without proposing underlying causes or they just presented associations of information. These accounts reveal that students can propose a valid framework and identify relevant information. However, they face difficulty in organizing their ideas and structuring a progressive sequence of events; this difficulty constrains the construction of a causal and coherent story (Faria et al. 2014; Kang et al. 2014; Zangori et al. 2015). Aligned with other results (e.g., Grotzer 2003; Perkins and Grotzer 2005; Russ et al. 2008; Taber and García- Franco 2010), our results show that students tend to reduce the complexity of the information, focusing their attention on a restricted set of causes or filling in their explanations with fragmented information or common sense ideas; in other cases, students tended to simplify the causal story of the phenomena, by solely reporting single occurrences of events without attributing the causes. In fact, our results show that a great number of explanations were statements about a general explicit law, e.g., particles are more agitated, water condenses, water dissolves the sugar. These general laws are considered sufficient, by the students, for explaining observed phenomena. These results add strength to the idea that students often understand the theoretical concepts and can use them, i.e., they understand *what* without understanding the phenomenon itself, i.e., without understanding *how* and *why* (McCain 2015; Strevens 2013).

In addition, the quantitative analysis of the students' answers reveals that the quality of the students' explanations differed depending on the phenomenon under analysis. Regarding Q2 and Q3, most of the students' answers are macroscopic descriptions, while for Q4, the accounts mostly represent the phenomenon at the submicroscopic level. Additionally, concerning Q3, most of the students' answers are non-explanations, contrary to Q2 and Q4 where no student presented an explanation having the maximum level of explanatory power. These findings are in line with the evidence showing that students' thinking varies with the context, and that their conceptual knowledge is difficult to characterize (Russ et al. 2008, Taber and García-Franco 2010). Every student arrives to the science classroom with productive knowledge, and they may vary in how they apply that knowledge, so it is difficult to perceive what takes priority in particular cases (Siegler 1996). As a result, students may apply some knowledge in one context and a different knowledge in what seems like a similar context. With regard to our results, we have some suggestions for the in-subject discrepancies observed in the quality of students' accounts.

In Portuguese science curriculum (MEC 2013), during the seventh grade, the phenomena of dissolution (Q2) and of physical transformations and energy transfer (Q3) are first presented under a macroscopic conceptualization. Later, in the eighth grade, the particulate nature of matter is introduced and the same phenomena are revisited under a submicroscopic conceptualization. Physical transformations are now interpreted based on freedom of movement and on the proximity of the particles, and the freedom of movement is related to variations in temperature. The dissolution of substances is now related to the constant motion of particles and the empty space between them. However, the phenomenon of thermal expansion of a gas (Q4) is only introduced in the eighth grade, with the introduction of particulate nature of matter. In their attempt to make sense of observed phenomena (Q2 and Q3), students may be using macroscopic concepts which, in their perception, is relevant and sufficient enough to explain the phenomenon; however, they are unable to recognize the non-observable submicroscopic entities that lay beyond the observable. Apart from this, thermal expansion of a gas was never approached in school from a macroscopic perspective, which may account for the results—most of the answers at the submicroscopic level.

Students constantly test the viability of their ideas, and if they *fit* the observed phenomenon, they are perceived as sufficient to explain the phenomenon (Taber, and García-Franco 2010; Parnafes 2012). For example, a study by Taber and García-Franco (2010) with secondary school students showed that a single student can explain apparently similar phenomena, such as the mixing of two substances, using different frameworks. For some phenomena, e.g., salt dissolving in water, students recognize causes and seek causal agents, yet for other phenomena, e.g., diffusion of vegetable dye in water, students do not identify the causes, and they will attribute events to the inherent nature of the materials, i.e., substances naturally react, because it is just how it happens.

For students to develop an integrated view of the phenomena, they have to shift between macroscopic and submicroscopic levels. Such explanations do not occur spontaneously, rather they have to be carefully supported and guided by the teacher for long enough periods of time (Taber 2013). Without this support, students can hardly relate their previous conceptions to each of these levels (macroscopic and submicroscopic), so "naturally," students will continue to reason according to a macroscopic conceptualization. Regarding Q3, in particular, the presented phenomenon is counter-intuitive (the idea that an ice cube melts outside the fridge is more intuitive than the idea that air condenses on the surface of a can). This particular characteristic poses increased difficulties for choosing a conceptual framework that students can use for telling a causal story. Research has shown that identifying ideas of science that can be used to make sense of a natural phenomenon is difficult for students (Tang 2016; Russ et al. 2008), even more when they are required to conciliate apparently disconnected phenomenon in one global idea. In these situations, students tend to use restricted and situational conceptual frameworks (Faria et al. 2014; Zangori et al. 2015).

Finally, the results presented here give strength to the system of analysis. The distribution of students' answers is consistent with the literature, illustrating the difficulties they face when involved in constructing their own scientific explanations. Additionally, the system of analysis proved useful for assessing the quality of the students' explanations, as well as for identifying their difficulties with basic dimensions when they are required to



construct a good scientific explanation. Therefore, our results are aligned with other studies illustrating students' difficulties when involved in the construction of their own scientific explanations (e.g., Cheng and Brown 2015; Faria et al. 2014; Kang et al. 2014; Tang 2016; Yeo and Gilbert 2014; Zangori et al. 2015). Educational studies also suggest that students have to have real opportunities at being involved in the construction of their own explanations throughout their science classes in order to improve (NRC 2012; Tang 2016; Zangori et al. 2015). Many studies point out that science teaching practices are based on compartmentalized, not contextualized learning, experiences (Faria et al. 2014) providing the students with few opportunities for getting involved with authentic scientific practices. As a result, these teaching practices hinder the development of more abstract reasoning about complex processes (Perkins and Grotzer 2005; Zangori and Forbes 2015). Studies in this domain (e.g., Kang et al. 2014; NRC 2012; Parnafes 2012; Russ et al. 2008; Tang 2016; Zangori and Forbes 2015) show the importance of breaking down the process of learning to construct explanations at various levels of progressive difficulty. With the present system of analysis, we hope to contribute to support the systematic analysis of students' explanations, throughout the level of explanatory force, and to help teachers and educators in supporting students to improve their constructed explanations.

**Acknowledgements:** This study is supported by the Portuguese National Foundation for Science and Technology (SFRH/BD/119701/2016). The authors are grateful to the teachers and students who participated in this study.

## References

- Berland, L. K., & Reiser, B. J. (2009). Making sense of argumentation and explanation. *Science Education*, 93(1), 26–55.
- Braaten, M., & Windschitl, M. (2011). Working toward a stronger conceptualization of scientific explanation for science education. *Science Education*, 95(4), 639–669.
- Brewer, W. F., Chinn, C. A., & Samarapungavan, A. (1998). Explanation in scientists and children. *Minds and Machines*, 8(1), 119–136.
- Brigandt, I. (2016). Why the difference between explanation and argument matters to science education. *Science & Education*, 25(3), 251—275.
- Cheng, M., & Brown, D. E. (2015). The role of scientific modeling criteria in advancing students' explanatory ideas of magnetism. *Journal of Research in Science Teaching*, 52(8), 1053–1081.
- Cohen, L., Manion, L., & Morison, K. (2007). Research methods in education. Routledge (e-library).
- Ehrlén, K. (2009). Drawings as representations of Children's conceptions. *International Journal of Science Education*, 31(1), 41–57.
- European Commission. (2007). *Science education now: a renewed pedagogy for the future of Europe*. Brussels: European Commission.
- Faria, C., Freire, S., Baptista, M., & Galvão, C. (2014). The construction of a reasoned explanation of a health phenomenon: an analysis of competencies mobilized. *International Journal of Science Education*, 36(9), 1476–1490.

- Ford, M. J., & Wargo, B. M. (2012). Dialogic framing of scientific content for conceptual and epistemic understanding. *Science Education*, 96(3), 369–391.
- Friedman, M. (1974). Explanation and scientific understanding. *The Journal of Philosophy*, 71(1), 5–19.
- Gilbert, J. K., Boulter, C., & Rutherford, M. (1998a). Models in explanations, part 1: horses for courses? *International Journal of Science Education*, 20(1), 83–97.
- Gilbert, J. K., Boulter, C., & Rutherford, M. (1998b). Models in explanations, part 2: whose voice? Whose ears? *International Journal of Science Education*, 20(2), 187–203.
- Grotzer, T. A. (2003). Learning to understand the forms of causality implicit in scientifically accepted explanations. *Studies in Science Education*, 39(1), 1–74.
- Harlen, W. (2015). *Working with big ideas of science education*. [www.interacademies.net/activities/projects/12250.aspx](http://www.interacademies.net/activities/projects/12250.aspx). Accessed 25 may 2016.
- Hempel, C. G., & Oppenheim, P. (1948). Studies in the logic of explanation. *Philosophy of Science*, 15, 135–175.
- Horwood, R. H. (1988). Explanation and description in science teaching. *Science Education*, 72(1), 41–49.
- Jördens, J., Asshoff, R., Kullmann, H., & Hammann, M. (2016). Providing vertical coherence in explanations and promoting reasoning across levels of biological organization when teaching evolution. *International Journal of Science Education*, 38(6), 960–992.
- Kang, H., Thompson, J., & Windschitl, M. (2014). Creating opportunities for students to show what they know: the role of scaffolding in assessment tasks. *Science Education*, 98(4), 674–704.
- Keil, F. C. (2006). Explanation and understanding. *Annual Review of Psychology*, 57, 227–254.
- Kitcher, P. (1989). Explanatory unification and the causal structure of the world. In P. Kitcher & W. C. Salmon (Eds.), *Minnesota studies in the philosophy of science: Scientific explanation* (Vol. XIII, pp. 410–499). Minneapolis: University of Minnesota Press.
- Kulgemeyer, C., & Schecker, H. (2013). Students explaining science—assessment of science communication competence. *Research in Science Education*, 43, 2235–2256.
- McCain, K. (2015). Explanation and the nature of scientific knowledge. *Science & Education*, 24, 827–854.
- McNeill, K. L., Lizotte, D. J., Krajcik, J., & Marx, R. W. (2006). Supporting students' construction of scientific explanations by fading scaffolds in instructional materials. *Journal of the Learning Sciences*, 15, 153–191.
- Ministério da Educação e Ciência. (2013). *Metas Curriculares do 3.º Ciclo do Ensino Básico: Ciências Físico-Químicas*. Lisboa: Ministério da Educação e Ciência.
- National Research Council, USA. (2012). *A framework for K-12 science education: practices, crosscutting concepts, and core ideas*. Committee on a Conceptual Framework for New K-12 Science Education Standards. Board on Science Education, Division of Behavioral and Social Sciences and Education. Washington, DC: The National Academies Press.



- Norris, S. P., Guilbert, S. M., Smith, M. L., Hakimelahi, S., & Phillips, L. M. (2005). A theoretical framework for narrative explanation in science. *Science Education*, 89(4), 535–563.
- Ohlsson, S. (2002). Generating and understand qualitative explanations. In J. Otero, J. A. León, & A. C. Graesser (Eds.), *The psychology of science text comprehension*. London: Lawrence Erlbaum Associates.
- Osborne, J., & Dillon, J. (2008). Science education in Europe: critical reflections. <http://www.fisica.unina.it/traces/attachments/article/149/Nuffield-Foundation-Osborne-Dillon-Science-Education-in-Europe.pdf>. Accessed 26 March 2013.
- Osborne, J. F., & Patterson, A. (2011). Scientific argument and explanation: a necessary distinction? *Science Education*, 95, 627–638.
- Parnafes, O. (2012). Developing explanations and developing understanding: students explain the phases of the moon using visual representations. *Cognition and Instruction*, 30(4), 359–403.
- Perkins, D. N., & Grotzer, T. A. (2005). Dimensions of causal understanding: the role of complex causal models in students' understanding of science. *Studies in Science Education*, 41(1), 117–165.
- Prain, V., Tytler, R., & Peterson, S. (2009). Multiple representation in learning about evaporation, International. *Journal of Science Education*, 31(6), 787–808.
- Rönnebeck, S., Bernholt, S., & Mathias Ropohl, M. (2016). Searching for a common ground—a literature review of empirical research on scientific inquiry activities. *Studies in Science Education*. doi:10.1080/03057267.2016.1206351.
- Ruiz-Primo, M. A., Li, M., Tsai, S., & Schneider, J. (2010). Testing one premise of scientific inquiry in science classrooms: examining students' scientific explanations and student learning. *Journal of Research in Science Teaching*, 47(5), 583–608.
- Russ, R. S., Scherr, R. E., Hammer, D., & Mikeska, J. (2008). Recognizing mechanistic reasoning in student scientific inquiry: a framework for discourse analysis developed from philosophy of science. *Science Education*, 92(3), 499–525.
- Salmon, W. C. (1984). *Scientific explanation and the causal structure of the world*. Princeton: Princeton University Press.
- Salmon, W. C. (1989). *Four decades of scientific explanation*. Minneapolis: University of Minnesota Press.
- Siegler, R. S. (1996). *Emerging minds: the process of change in children's thinking*. New York: Oxford University Press.
- Songer, N. B., & Gotwals, A. W. (2012). Guiding explanation construction by children at the entry points of learning progressions. *Journal of Research in Science Teaching*, 49(2), 141–165.
- Strauss, A., & Corbin, J. (1998). *Basic of qualitative research. Techniques and procedures for developing grounded theory*. Thousand Oaks: Sage Publications.
- Strevens, M. (2008). *Depth: an account of scientific explanation*. Cambridge: Harvard University Press.
- Strevens, M. (2013). No understanding without explanation. *Studies in History and Philosophy of Science*, 44, 510–515.

- Taber, K. S. (2013). Revisiting the chemistry triplet: drawing upon the nature of chemical knowledge and the psychology of learning to inform chemistry education. *Chemistry Education Research and Practice*, 14, 156–168.
- Taber, K. S., & García-Franco, A. (2010). Learning processes in chemistry: drawing upon cognitive resources to learn about the particulate structure of matter. *Journal of the Learning Sciences*, 19(1), 99–142.
- Taber, K. S., & Watt, M. (2000). Learners' explanations for chemical phenomena. *Chemistry Education: Research and Practice in Europe*, 1(3), 329–353.
- Talanquer, V. (2011). Macro, submicro, and symbolic: the many faces of the chemistry "triplet". *International Journal of Science Education*, 33(2), 179–195.
- Tang, K. (2016). Constructing scientific explanations through premise–reasoning–outcome (PRO): an exploratory study to scaffold students in structuring written explanations. *International Journal of Science Education*, 38(9), 1415–1440.
- Thagard, P. (2007). Coherence, truth, and the development of scientific knowledge. *Philosophy of Science*, 74(1), 28–47.
- Watson, J. R., Prieto, T., & Dillon, J. S. (1997). Consistency of students' explanations about combustion. *Science Education*, 81, 425–444.
- Windschitl, M., Thompson, J., & Braaten, M. (2008). Beyond the scientific method: model-based inquiry as a new paradigm of preference for school science investigations. *Science Education*, 92(5), 941–967.
- Woodward, J. (2003). *Making things happen: a theory of causal explanation*. Oxford: Oxford University Press.
- Woodward, J. (2014). Scientific explanation. In: E. N. Zalta (Ed.), *The Stanford encyclopedia of philosophy*. <http://plato.stanford.edu/entries/scientific-explanation>. Accessed 10 Jan 2016.
- Yan, F., & Talanquer, V. (2015). Students' ideas about how and why chemical reactions happen: mapping the conceptual landscape. *International Journal of Science Education*, 37(18), 3066–3092.
- Yang, H. T., & Wang, K. H. (2014). A teaching model for scaffolding 4th grade students' scientific explanation writing. *Research in Science Education*, 44, 531–548.
- Yeo, J., & Gilbert, J. K. (2014). Constructing a scientific explanation: a narrative account. *International Journal of Science Education*, 36(11), 1902–1935.
- Zangori, L., & Forbes, C. T. (2015). Exploring third-grade student model-based explanations about plant relationships within an ecosystem. *International Journal of Science Education*, 37(18), 2942–2964.
- Zangori, L., Forbes, C. T., & Schwarz, C. V. (2015). Exploring the effect of embedded scaffolding within curricular tasks on third-grade students' model-based explanations about hydrologic cycling. *Science & Education*, 24, 957–981.

**Referência:** Andrade, V., Freire, S. & Baptista, M. (2021). Constructing Scientific Explanations for Chemical Phenomenon through Drawing among 8th-grade Students. *EURASIA Journal of Mathematics, Science and Technology Education*, 17(1), 1–13. <https://doi.org/10.29333/ejmste/9614>.

**Informação journal:**

Emerging Sources Citation Index (ESCI) (Clarivate Analytics): Education & Scientific disciplines—Journal Citation Indicator (JCI): 0.35 (2020)

Scopus: Social Sciences: Education (Q2): SJR 0,57 (2021)

### Versão dos autores

## Constructing Scientific Explanations for Chemical Phenomena through Drawings among 8th-grade Students

Vanessa de Andrade<sup>1</sup> | Sofia Freire<sup>1</sup> | Mónica Baptista<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Instituto de Educação da Universidade de Lisboa, PORTUGAL

**Abstract:** The current study examines the progress of 8th-grade student drawings and written explanations of chemical phenomenon, subsequent to being involved in an instructional strategy that explicitly involves drawing as a supportive tool to construct scientific explanations. Additionally, the study examines the association between the representation of specific conceptual elements, such as structure, motion, and interactions, and the explanatory level of students' written explanations. These goals were addressed by comparing the students' collected drawings and explanations by applying the same open-ended question before and after the instructional strategy. Results show that after the instructional strategy significantly more students created more accurate drawings and drawings depicting more conceptual elements. Additionally, the students' written explanations significantly changed, progressing from descriptive accounts to discussions of specific underlying mechanisms at the submicroscopic level. Furthermore, the association between students' written explanations and drawings was stronger after the strategy. This study strengthens the argument for drawing interaction in explanation construction.

**Keywords Scientific:** scientific explanations, drawings, visual representations, chemistry learning.

## INTRODUCTION

Science education research and recent curricular reforms have been addressing the importance of involving students in the construction of their own scientific explanations (e.g., Braaten & Windschitl, 2011; Cooper, 2015; McCain, 2015; NRC, 2012). From the many forms that scientific explanations may take, the causal-mechanistic explanations have been receiving considerable attention (Braaten & Windschitl, 2011; Cooper, 2015; Krist, Schwarz, & Reiser, 2018; NRC, 2012). These type of explanations provides a detailed account of the underlying mechanisms that give rise to phenomena as they focus on how and why the phenomena happen (Krist et al., 2018). Causal-mechanistic explanations require students to i) consider different scalar levels (i.e., the level of the phenomenon and the level of the underlying mechanisms); ii) use science theories and models to identify relevant causal factors; iii) identify relationships and interactions among factors, and finally iv) trace a logical and coherent causal story that connects the underlying mechanisms back to the phenomenon (Andrade, Freire, & Baptista, 2019; Krist et al., 2018). Causal-mechanistic explanations are particularly useful in chemistry as, despite the fact that changes of the properties of matter are observed at the macroscopic level, an explanation of such observations can only be reached through the mechanisms that lie at the submicroscopic level (i.e., the level of atoms and molecules) (Cooper, 2015; Talanquer, 2018). In addition, those mechanisms cannot be directly deduced from the individual properties of the submicroscopic entities; rather they are derived through the collective interactions of the submicroscopic entities which result from their intrinsic and random motion (Tümay, 2016). Thus, coordinating factors across macroscopic and submicroscopic scalar levels is critical for explaining chemical phenomena, and it is an essential dimension of this type of explanation as well.

Despite the importance of casual-mechanistic explanations in learning chemistry (Cooper, 2015; Talanquer, 2018), many studies have highlighted students' difficulties in constructing such explanations. Either students tend to simply describe the phenomena at the macroscopic level without discussing how and why it is produced or they intuitively interpret the submicroscopic-level mechanisms directly from the observed behavior of the phenomenon, failing to establish a coherent connection between the phenomenon and its underlying mechanisms (Andrade et al., 2019; Becker, Noyes, & Cooper, 2016; Moreira, Marzabal, & Talanquer, 2018; Rappoport & Ashkenazi, 2008; Talanquer, 2010).

Considering the nature of student difficulties, visual representations and, in particular, student-generated visual representations (for instance, through drawing) have been recognized as important tools for learning (Ainsworth, Prain, & Tytler, 2011; Cooper, Stieff, & DeSutter, 2017; Kozma & Russell, 2005). Visual representations make structures, behaviors, and processes that would otherwise be difficult to imagine accessible to students

(Kozma & Russell, 2005). Generating drawings requires students to use their actual knowledge of the subject (Chi, 2009). Student-generated drawings can translate mental representations of their knowledge to external and thus visible representations (Akaygun, 2016); such translation has been regarded as critical to trigger new understandings (Chi, 2009). Also, as students interact with their drawings and improve their understanding, drawings also improve (Taber, 2018), resulting in more accurate (i.e., consistent with the canonical representations of the discipline) and detailed drawings (i.e., comprehensive representations of the phenomenon that depict the key entities and how they behave and interact) (Chang, Quintana, & Krajcik, 2014; Prain, Tytler, & Peterson, 2009; Schwarz et al., 2009; Williams, Underwood, & Klymkowsky, 2015). In turn, as students' understanding and drawings improve, they are more likely to make inferential connections between the underlying mechanisms and the observed phenomenon (Chang et al., 2014; Cooper et al., 2017), which is fundamental for constructing mechanistic explanations.

Nevertheless, despite research suggesting the important benefits of drawings for learning chemistry, it has also demonstrated that the benefits of drawing cannot be taken for granted. For instance, Kelly and Jones (2008) showed that unless the drawings are purposefully integrated into practices, they may not always provide the expected benefits for student learning. Indeed, the potential benefits of drawings lie on their use in supporting other critical aspects of inquiry, such as making predictions, depicting models (Prain et al., 2009; Schwarz et al., 2009; Wilkerson-Jerde, Gravel, & Macrander, 2015), developing arguments (Oliveira, Justi, & Mendonça, 2015) and explaining (Chang et al., 2014; Parnafes, 2010). Otherwise, students might produce drawings as an isolated exercise, with little understandings of the underlying explanatory possibilities (Cooper et al., 2017).

Despite evidence supporting the importance of the integration of drawings into classroom activities to help students learn chemistry, its optimal design remains poorly understood (Cooper et al., 2017; Taber, 2018). The current study seeks to overcome this gap by designing an instructional strategy that purposefully uses drawing as a tool for constructing scientific explanations by examining students' progress both in drawings and explanations after being involved in the instructional strategy.

## **Drawings to Support Explanation Construction**

Constructing a scientific explanation for chemical phenomena requires extensive support and practice (Cooper, 2015). Drawings (and generating drawings) display some characteristics that show promise for assisting students in the process of constructing explanations.

Students can use drawings for representing their global view of a problem (Wilkerson-Jerde et al., 2015), for checking and conveying ideas for self and others (Tversky

& Suwa, 2009), and, in chemistry, for representing unobservable submicroscopic entities as well as their spatial organization and dynamic behavior.

Furthermore, when students generate their own drawings, they have to actively identify the relevant elements and to make decisions regarding how to represent it spatially, organizationally, and relationally (Wilkerson-Jerde et al., 2015; Zhang & Linn, 2011), and thus to activate previous knowledge (Leenaars, van Joolingen, & Bollen, 2013). In addition, drawings are more effective in revealing students' current understanding than other modes of representation, such as verbal (Cooper et al., 2017) and in detecting contradiction in their understanding (e.g., Ardac & Akaygun, 2005; Becker et al., 2016; Chang et al., 2014). For instance, Williams and colleagues (2015) reported that while students were able to write coherent descriptions of what they meant by intermolecular forces, they were not able to consistently draw the intermolecular forces, suggesting that they had memorized the definition of intermolecular force without internalizing its underlying idea. Thus, drawing makes it possible to access students' level of understanding. Importantly, student-generated drawings can also provide an opportunity for them to examine their level of understanding and to detect possible contradictions in their reasoning, which can then be "self-repaired" (Chi, 2009). Encouraging students to re-examine, revise, and discuss their drawings can push new, more complex understandings which, in turn, prompt new ideas and more complex explanations (Chang et al., 2014).

Therefore, drawing may play an important role in the construction of scientific explanations since it helps students to understand the concepts of chemistry and can be used to infer the underlying mechanisms from which chemical phenomena emerge. To this end, careful attention should be paid to how drawing might be integrated into instruction and provide students with opportunities to interact with what they have represented in light of the phenomena that they are trying to explain.

## **Contribution to the literature**

- There is a need for studies for centrally integrating drawing practice into classroom activities. Despite the growing interest in students' drawings and scientific explanations, studies that examine student progress in both, and that discuss their association, are scarce.
- In the current study an instructional strategy was designed that purposefully uses drawing as a tool for constructing scientific explanations in the chemistry classroom. This study examines the association between the representation of specific conceptual elements of students' drawings, such as structure, motion and interactions and the explanatory level of students' written explanations.

## **Current Study**

This study is part of a broader research project, of which the main goal is to understand how engaging students in generating drawings supports students' construction of scientific explanations of chemical phenomena. In particular, the current study aims to examine the progress regarding students' drawing and written explanations subsequent to being involved in an instructional strategy that explicitly involves drawing for supporting student's construction of scientific explanations. The aim was also to examine the association between the representation of specific conceptual elements, such as structure, motion and interactions, and the explanatory level of students' written explanations.

## METHODS

### Study Design and Instructional Strategy

The study design involved a specific instructional strategy where the generation of drawings at different scalar level was purposefully integrated to support the construction of scientific explanations. This strategy consists of requiring students to make observational descriptions of the phenomenon, then supporting students' transition to reason about the submicroscopic-level mechanisms, and finally helping them link the underlying mechanisms back to the observed phenomenon (Schwarz et al., 2009). The strategy involved the following sequence of activities:

*Observation:* First, students conducted a laboratory experiment where they had the opportunity to observe phenomena events at the macroscopic level.

*Description:* Second, students were asked to draw what they had observed. The intention was to help them attend and select relevant aspects of the observed phenomenon and to provide them with a physical artefact, on which they could later rely for checking how the underlying submicroscopic mechanisms connect to the observed phenomenon.

*Interpretation:* Third, students were asked to create a drawing representing the submicroscopic-level mechanisms. To accomplish this, students received specific prompts, such as: to consider the smaller parts that make up matter (e.g., Imagine that you could see the particles that make up matter...); to consider its structural features (e.g., How would those particles look like, for instance in relation to shape and size, and how are they distributed through space?); and to consider its dynamic features (e.g., What are those particles doing? How do those particles relate and interact among each other, causing what you have observed?). The goal of this step was to provide guidance in producing drawings that would be more a model of how the entities in the system behave and interact rather than superficial representations of structural aspects.

*Explanation:* Finally, students used their drawings to write a scientific explanation for the observed phenomenon. While doing so, students were explicitly asked to go back to their

drawings and use them. They were also explicitly told that the explanation should include: what happens (i.e., describe the behavior of the phenomenon at the macroscopic level) and to make an account of how and why happens (i.e., describe how submicroscopic entities behave and interact to produce the phenomenon and why this explains what was observed). Although the strategy is presented in a linear sequence, students could go back and forth and giving them the opportunity to change their drawings and written explanations in this process, as they derived meaning from their drawings and as they reasoned about the phenomenon.

The instructional strategy was implemented across a unit comprising seven activities that explored different chemical phenomenon related to the particulate nature of matter and chemical reactions, which are part of the Portuguese basic education science curriculum (MEC, 2013). The whole intervention lasted 28 consecutive lessons of 45 minutes each (three lessons per week). Throughout these lessons students worked in groups of three to four students; therefore all students' drawings and explanations were co-creations. We addressed our research question by collecting students' drawings and written explanations from a paper-and-pencil questionnaire purposefully designed for the current study. All students completed the questionnaire individually at two different moments: before (moment T1) and after (moment T2) the implementation of the instructional strategy.

## Participants

This study was conducted at the classroom level in a Portuguese public school located in a suburban, middle- class neighborhood. Participants belonged to five eighth- grade classes taught by the same science teacher, performing a total of 103 students (56,3% female and 44% male; age  $M = 13.4$ ,  $SD = .76$ ). Some students did not respond, and others presented answers that were not perceptible; thus, analysis focused on 92 drawings and 98 explanations at moment T1, and 95 drawings and 91 explanations at moment T2.

## Data Source

A questionnaire (Andrade et al., 2019) was designed to explore the curricular concepts of the particulate nature of matter previously taught in the chemistry classes. The current study analyzed students' drawings and written explanations in response to an item of the questionnaire about sugar dissolving in water, which was presented as follows:

*Here you have two glasses of water: sugar was added to just one of them, but you cannot distinguish one from the other. Imagine that you could see the particles of matter and draw what you would see happening in the glass with only water (box 1) and in the glass with water where sugar was added (box 2).*



The study was presented to, and authorized by, the pedagogical board of the school. Parents were informed about the project and the procedures in classroom and gave their informed consent. The instruments used in the classroom were reviewed and approved by the Ministry of Education. All procedures were aligned with the Ethical Letter of the institution of the authors of this study, namely confidentiality of the data collected and benefits for students' learning and the teacher's professional development, and a connection with the science group of the institution.

## **Data Coding and Analysis**

### ***Students' written explanations***

All students' written explanations were coded using a six-level system of analysis previously developed by the Andrade et al. (2019). According to the model that supports this system, a written explanation with a high explanatory level involves a detailed description of the underlying mechanisms, and makes an account of both how submicroscopic entities produce the phenomenon and why the phenomenon behaves as observed (Andrade et al., 2019). Consistently, students' explanations were coded as *non-explanations*—non-theoretical or tautological accounts for what they observe, *macro-descriptive explanations*—accounts describing what happened at the macroscopic level, or *mixed-descriptive explanations*—accounts describing what happened using macroscopic and/or submicroscopic level concepts but where both levels are used inconsistently, *associative explanations*—accounts where relevant factors are associated yet no causal relationships among factors are identified; *simple-explanation*—accounts establishing a logical and coherent account regarding how and why the phenomenon happened using simple and linear causal mechanisms, and *complex-explanation*—accounts using logical, coherent and complex causal mechanisms accounting for how and why the phenomenon happened. After coding the students' explanations, a score was given to each code in order to create a quantitative variable which ranges from 0 to 5 (the highest explanatory level = 5). In order to assess the agreement between authors, the second author independently coded 10% of the students' explanation. Students' answers were randomly and independently assigned to one of the two authors. The inter-rater reliability measured by Cohen's kappa coefficient (Cohen et al., 2007) was 0.83. After discussion, a total agreement was obtained.

### ***Students' drawings***

The framework of scientific explanations (i.e., the causal-mechanistic model previously mentioned) informed analyses of the students' drawings and, thus, the students' drawings were analyzed against the expectation of having elements related to the structure of the key entities of the system, as well as elements related to the mechanisms underlying the phenomenon, such as the properties of those entities and how they behave and interact.

Accordingly, the students' drawings were analyzed considering three conceptual elements: *structure*, *motion*, and *interactions*. *Structure* (S) refers to how students represent the structure of the entities that make up the system, such as particles, atoms, or molecules, and their sizes, shapes, and positions in space. *Motion* (M) refers to how students depict the movement of the entities represented in the drawing. *Interactions* (I) refers to how students represent entities' behavior and the interactions among them.

After examining each students' drawing for the presence of each element, closer scrutiny of all the students' drawings was then conducted, and each of the three elements were coded in levels of performance for their accuracy (i.e., degree of resemblance to normative representation). This was an iterative process between a top-down analysis informed by literature on students' conceptions of the particulate nature of matter Merritt, Krajcik, and Schwarz (2008) for structure; and Sevia and Stains (2013) and Talanquer (2009) for motion and interactions) and a bottom-down analysis based on empirical data (i.e., the students' drawings). In this process, the first author generated a tentative list of performance levels for each element, which was then used for further categorizing drawings. In an iterative way, the performance levels for each of the three elements were then refined. This process was repeated until a suitable coding scheme emerged (Lincoln & Guba, 1985). Table 1 illustrates the coding scheme with some examples of students' drawings. Scores ranging from 0-2 were assigned to each performance level of the elements: *structure*, *motion*, and *interactions* (more accurate representations = 2) (see Table 1). The first author then used the coding scheme to code all the students' drawings, and the second author coded 10% of randomly selected drawings. The inter-rater reliability between the two authors measured by Cohen's kappa coefficient was 0.85 for the element structure, 0.87 for motion, and 0.80 for the interactions (Cohen, Manion, & Morison, 2007). Any ambiguities were discussed and resolved collectively, which occasionally also involved re-describing the levels when necessary. In the end, a 100% agreement among the two authors was reached.

**Table 1.** Description and examples of each element of students' drawings

| The elements of the drawing                                                                                                                                                  | Description (scores)                                                             | Sample answers from students' drawings of the sugar dissolution in water phenomenon   |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| <i>Structure (S)</i>                                                                                                                                                         |                                                                                  |                                                                                       |
| How students represent the structure of the entities that make up the system, such as particles, atoms or molecules, in relation to their size, shape and position in space? | <i>Macro-structure of matter (score 0)</i>                                       |                                                                                       |
|                                                                                                                                                                              | Students represent matter as a continuous medium, with no underlying structures. |  |



## Analysis

First, in order to have a global image regarding students' drawings and written explanations, descriptive statistics of the students' answers at the moments T1 and T2 were computed. Secondly, a set of Wilcoxon non-parametric tests were used to explore the differences between students' drawings and explanations at the moments T1 and T2. Finally, the Spearman's rho ( $\rho$ ) correlations coefficients among elements of the drawing (*structure*, *motion*, and *interactions*) and the explanatory level of students' written explanations were computed at moments T1 and T2.

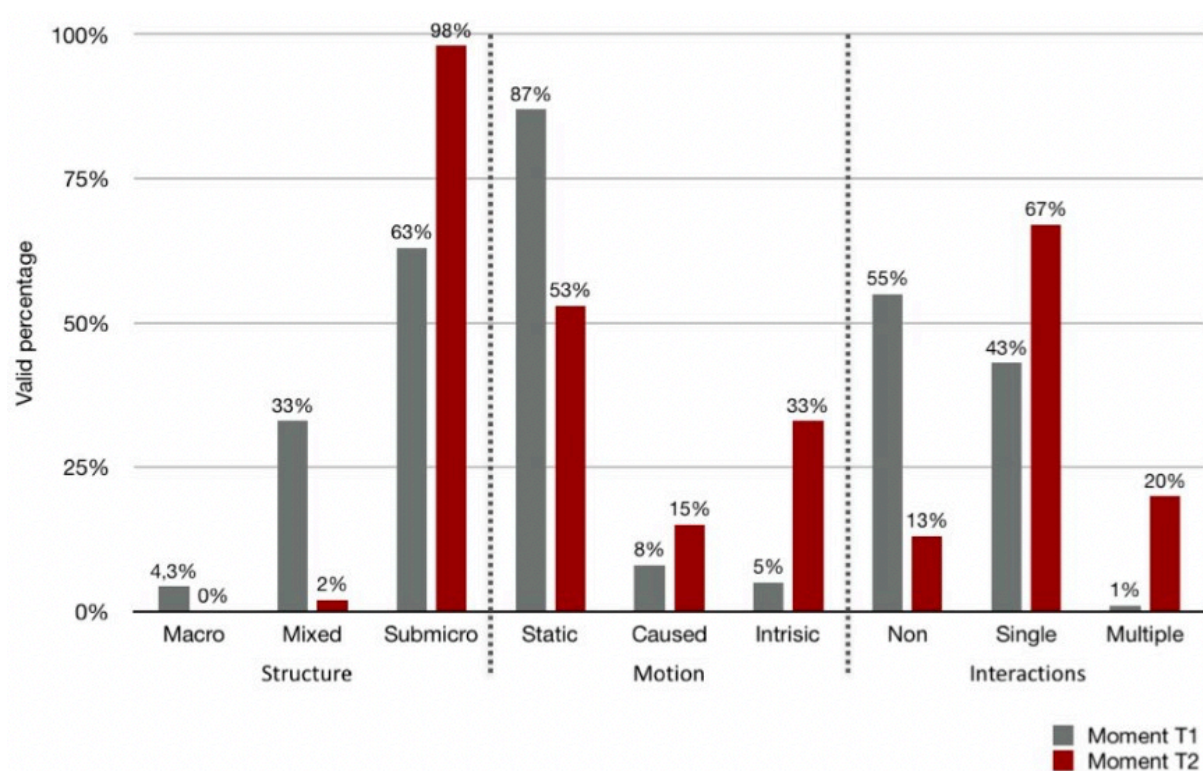
## RESULTS

### Differences between Students' Drawings and Written Explanations at Moment T1 and T2

#### Students' drawings

The quality of students' drawings differed significantly from moment T1 to T2 for each element of

the drawings: *structure* (S) ( $W_s = 406.000$ ,  $z = -5.013$ ,  $p = .000$ ); *motion* (M) ( $W_s = 684.000$ ,  $z = -5.174$ ,  $p = .000$ ); and *interactions* (I) ( $W_s = 1225.000$ ,  $z = -6.761$ ,  $p = .000$ ). In general, students performed better at moment T2 than at T1 regarding the representation of these three elements (see [Figure 1](#)).



**Figure 1.** Distribution in percentage of the scores for each element of students' drawings at moment T1 and T2

Regarding *structure*, at moment T2, almost all of the students' drawings (98%) represented the substances involved in the phenomenon as a discontinuous structure with empty spaces (submicro-structure). This contrasts with the proportion of students (33%) that, at moment T1, drew a mixed structure of matter (mixed- structure), incorporating ideas of discontinuous structure within a continuous medium.

As for *motion*, at moment T1, the majority of the students (87%) did not represent the particles' motion (static). However, at moment T2, despite the substantial proportion of students (53%) that continued to not represent motion, a higher proportion (33%) represented particles exhibiting intrinsic motion (intrinsic-motion) when compared with the small proportion (5%) at moment T1.

Finally, regarding *interactions*, at moment T2 the proportion of students (67%) that considered at least one relevant interaction (single-interaction) was higher than at moment T1 (43%). Additionally, a higher proportion of students depicted more than one interaction (multiple-interactions) (20%) in contrast with the low proportion of students (1%) that had done so at moment T1.

To get a better sense of what students' drawings looked like at moment T1 and T2, an example of a typical pattern found in the progression of students' drawings is described (see [Figure 2](#)).

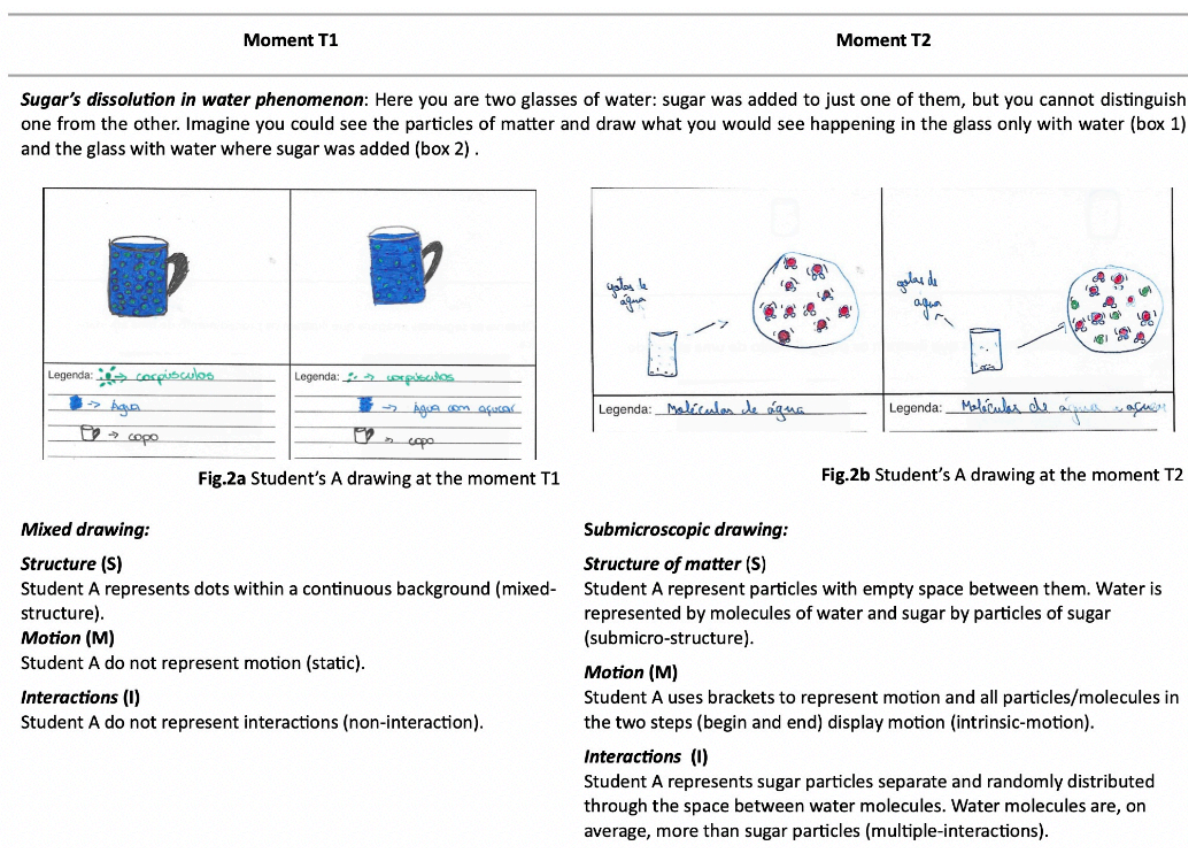
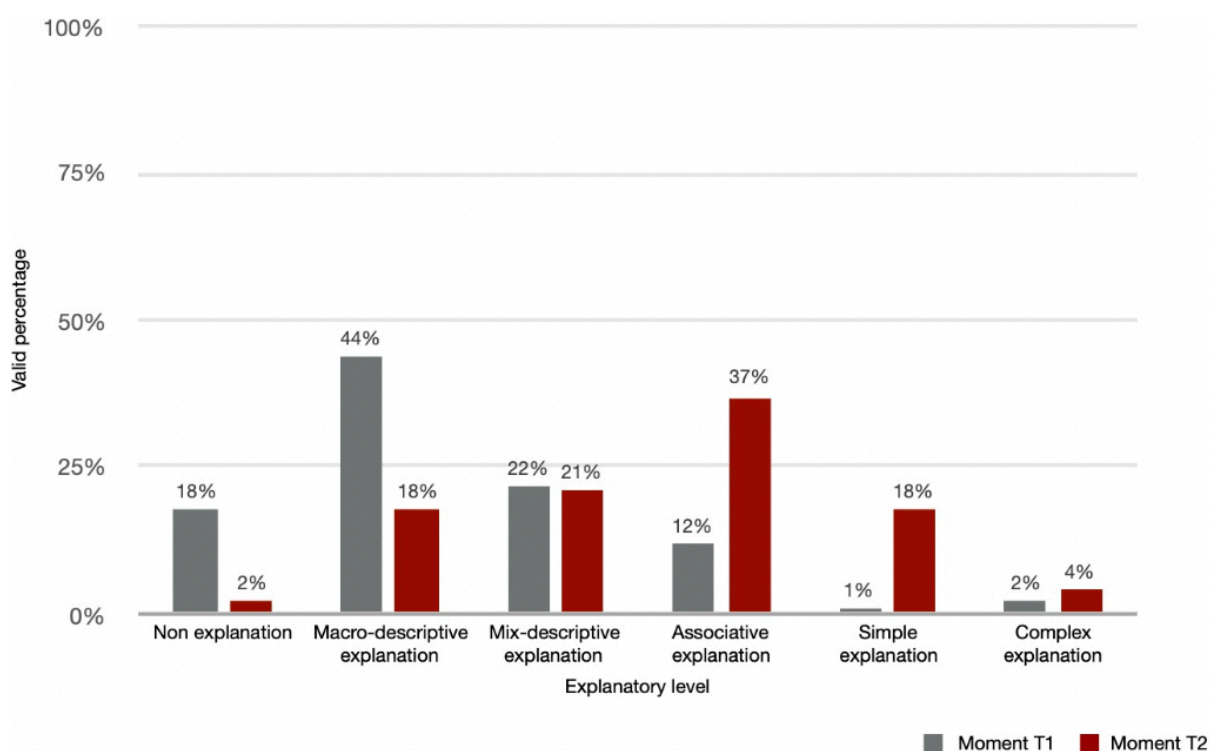


Figure 2. Student's drawings at moment T1 and T2

As seen in Figure 2a, student A illustrated water and sugared water both as continuous mediums. Embedded in these continuous mediums, the student depicted dots, which were labelled as particles, although without a clear indication of the nature of these particles. In contrast, at moment T2, student A represented the two substances, water and sugar, with discrete particles randomly distributed throughout the empty space (see Figure 2b). He represented water with a molecular structure, i.e., depicting small circles holding on together that stand for the atoms that make up the molecule, and sugar by a particulate structure, i.e., each circle corresponds to a particle of sugar. Student A's contrasting drawings are an example of a typical pattern found in students' drawings which suggests progress in the conceptualization of the structure of matter, from being aware of particles to actually developing a particulate view of matter. Another contrasting aspect found in student A's drawings from moment T1 to T2 relates to motion's representation. As the example of student A shows, at moment T1, the particles were represented as static since no element, such as brackets or wavy lines, was drawn (see Figure 2a). However, at moment T2, student A explicitly depicted motion by adding brackets to the particles represented (see Figure 2b). In addition, in both situations (only water and sugar dissolving in water) particles were represented as moving. The contrasting drawings of student A suggest a progression from thinking of particles as fixed in space to assuming that particles move through space. Moreover, the fact that, at moment T2, student A depicted particles' motion



independently from the situation (only water and sugared water), suggests an understanding of movement as an intrinsic property of particles, rather than something sustained by a causal factor, e.g., as the result of the dissolution process. Finally, at moment T2, student A depicted sugar particles separated from each other and dispersed throughout the empty space between the water molecules. In contrast, at moment T1, it was not explicitly drawn how water particles and sugar particles end up after dissolution. Student's A contrasting drawings indicate that the student at moment T1 was not clear about what was happening at the submicroscopic level or how it might be represented visually. On the contrary, when at moment T2 student A depicted sugar's particles interspersed throughout water molecules and moving, he revealed awareness of the behavior and interactions of the particles that give rise to the phenomenon of sugar dissolving in water.



**Figure 3.** Distribution in percentage of the levels of the students' written explanations at moment T1 and T2

### ***Students' written explanations***

The explanatory level of students' written explanations also differed significantly from moment T1 to T2 ( $W_s = 2485.000$ ,  $z = -7.453$ ,  $p = .000$ ). In general, more students at moment T2 achieved a higher- explanatory level.

At moment T1, 44% of students macroscopically described the phenomenon of sugar dissolving in water (macro-descriptive). The following is a typical example of a macro-descriptive account given by students at the moment T1.

*One cannot distinguish between the two glasses, because the sugar dissolves in water, and the colour of the water is the same as it was before the sugar had been added, so one cannot distinguish between them (Student B).*

In the above instance, student B appropriately identified the target phenomenon as “sugar dissolves in water” and described what occurs without explaining how and why it occurs. Students who present such accounts have the ability to evaluate the macroscopic features of the phenomenon appropriately based on their prior experiences or knowledge (e.g., that dissolution forms a homogeneous medium). However, student B did not consider the submicroscopic level, and so he could not go further in proposing the possible underlying mechanisms for how the sugar dissolves or why it forms a homogeneous medium. In contrast, at moment T2, the written explanation typically given by the majority of students considers the submicroscopic level (37% of the students presented associative explanations identical to the one presented by student B, 18% a simple explanation and 4% a complex explanation). The following is a typical example of an associative explanation given by students at moment T2.

*Because sugar dissolves in water, the two glasses look alike. Because the particles occupy the empty spaces (Student B).*

This example contrasts with student B’s macro- descriptive explanation, at moment T1, as he considered submicroscopic entities by naming “particles” and identified which entities’ behavior produced the phenomenon: “occupy the empty spaces”. Moving from macro-descriptive to associative explanations suggests a significant improvement in students’ written explanations, as it indicates that students started to consider what is going on at the submicroscopic level that explains how and why the phenomenon occurs. Yet, this type of explanation still presents many gaps in the mechanisms underlying the phenomenon. For example, what are the properties of submicroscopic particles that enable them to interact as they do? How do particles actually occupy the empty spaces? In addition, at moment T2, 18% of the students presented a simple- explanation, which contrasts with the 1% of the students who did it at moment T1. The following is a typical example of a simple-explanation given by students at moment T2.

*You cannot distinguish the sugared water from the water, because sugar is made of particles in constant motion and they occupy the empty spaces that exist between water particles. In this way it forms a homogenous solution, so one cannot distinguish one glass from the other (Student C).*

Students who presented such explanations, as the example shows, besides considering the submicroscopic level and identifying relevant entities and properties, were also able to trace a coherent connection of how the submicroscopic entities behave and interact to produce the phenomenon. However, they perceived the process in one



preferential way, e.g., “sugar is made of particles in constant motion and they occupy the empty spaces”, and not as an interaction between the entities participating in the system (sugar and water particles).

## Relationship between Students’ Drawings and Written Explanations at Moment T1 and T2

The explanatory level of students’ written explanations was significantly and positively correlated with the three elements considered for students’ drawings (*structure*, *motion*, *interactions*), although correlations differ from moment T1 to T2 (see Table 2). At moment T1, students’ written explanations were weak to moderately correlated with all the elements of students’ drawings (*structure*:  $\rho=.42$ ,  $p=.00$ ; *motion*:  $\rho=.27$ ,  $p=.01$ ; and *interactions*:  $\rho=.36$ ,  $p=.00$ ). In contrast, at moment T2, students’ written explanations were weakly correlated with the element *structure* ( $\rho=.21$ ,  $p=.01$ ), but strongly correlated with the element *motion* ( $\rho=.64$ ,  $p=.00$ ) and *interactions* ( $\rho=.60$ ,  $p=.00$ ).

**Table 2.** Spearman’s rho ( $\rho$ ) correlations between students’ explanation and each categories of students’ drawings

|                        | Moment T1 |       |     | Moment T2 |       |       |
|------------------------|-----------|-------|-----|-----------|-------|-------|
|                        | 1         | 2     | 3   | 1         | 2     | 3     |
| 1. Written explanation |           |       |     |           |       |       |
| Drawing element:       |           |       |     |           |       |       |
| 2. <i>structure</i>    | .42**     |       |     | .21*      |       |       |
| 3. <i>motion</i>       | .27**     | .13   |     | .64**     | .14   |       |
| 4. <i>interactions</i> | .36**     | .59** | .11 | .60**     | .33** | .52** |

\*  $p < 0.05$  ; \*\*  $p < 0.01$  two-tailed

At moment T2, all of the students who achieved the highest explanatory-levels (*simple* or *complex explanation*) represented matter as a submicroscopic structure (*simple-explanation*: 18/18 and *complex-explanation*: 4/4), and the majority of them represented particles exhibiting intrinsic motion (*simple-explanation*: 12/18 and *complex-explanation*: 4/4) and multiple relevant interactions (*simple-explanation*: 10/18 and *complex-explanation*: 3/4) (see Figure 4b for a sample answer). In contrast, although the majority of students who presented *macro* and *mixed* written explanations have also drawn an accurate submicroscopic structure of matter (*macro-descriptive*: 12/18; and *mixed-descriptive*: 19/19), only a small proportion of them represented motion (*macro-descriptive*: 0/18 (*caused*) and 0/18 (*intrinsic*); *mixed-descriptive*: 1/19 (*caused*) and 2/19 (*intrinsic*)), and the majority of them did not represent more than one relevant interaction (*macro-descriptive*: 0/18; *mixed-descriptive*: 1/19). As an illustrative example of the association between the elements of students’ drawings and the explanatory-level of their written explanations,

Figure 4 shows one students’ drawing and written explanation at moment T1 and T2, which represents a typical pattern found for how most student drawings and explanations related.

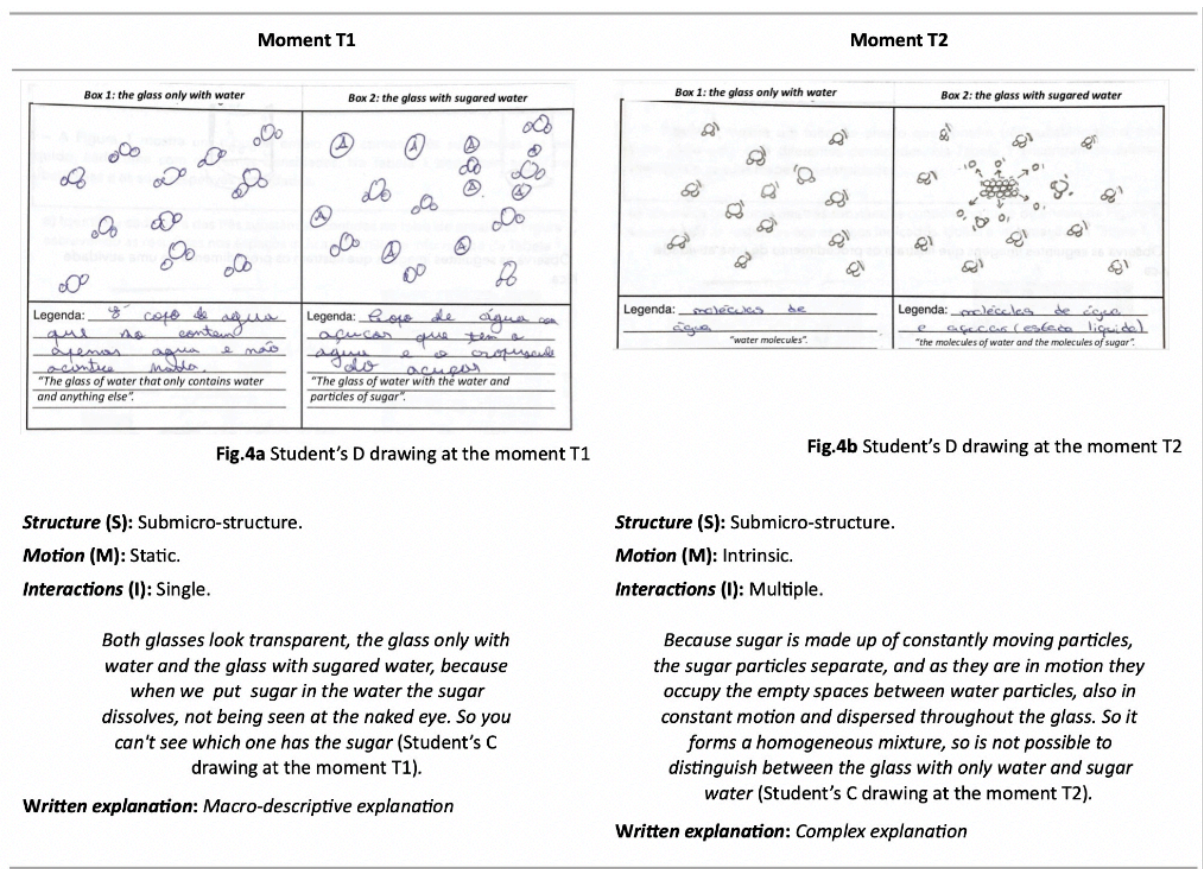


Figure 4. Students’ drawings and written explanations at moment T1 and T2

At moment T1, student D drew the submicroscopic structure of matter, depicting all the substances involved (water and sugar) as particles randomly distributed through the empty space and the sugar particles scattered among water particles. This contrasts with student D’s written explanations, a macroscopic-level description of what happened, which did not consider the submicroscopic level and thus did not discuss the possible mechanisms by which the dissolution of sugar happened. At moment T2, besides an accurate submicroscopic structure of matter, student D also depicted motion in the two situations (only water: box 1 and sugared water: box 2) and for all of the particles. Besides, student D drew multiple interactions, which include not only the sugar particles spreading among the empty spaces of the water particles but also the sugar particles separating from its structure, showing how sugar particles were able to disperse through the particles of water. Consistently with the drawing, when explaining how and why the phenomenon occurs, student D not only considered the submicroscopic level (“sugar particles”, “water particles”) but also discussed the mechanism by which sugar dissolves, emphasizing motion (“sugar is made up of constantly moving particles”, “water particles, also in constant motion”) as a key property of the submicroscopic entities and indicating how this property

works ("as they are in motion they occupy the empty spaces" and "dispersed throughout the glass") to produce the observed phenomenon ("forms a homogeneous mixture"). Student's D drawing and explanation at moment T2 represents a typical example of those students who achieved the highest explanatory-levels (*simple* or *complex explanation*) and whose drawings were associated with accurate submicroscopic representations of matter and strongly associated with the representation of particles' intrinsic motion and the multiple interactions undergone by them.

## DISCUSSION

Results showed that after the instructional strategy students were significantly more likely to draw aspects related to the structure of matter that resemble its particulate nature. Furthermore, after instruction, students were significantly more likely to depict how particles behave and interact in producing the phenomenon by illustrating particle movement and interactions. These are important results as studies have shown that students' visual representations tend to focus more on depicting static aspects, such as the structure and composition of entities, and less on dynamic aspects, such as motion and interactions (Becker et al., 2016; Ryan & Stieff, 2019). Some of the reasons that have been pointed out are: students do not have well-developed abilities to convey visual-spatial information (e.g., to include wavy lines to represent motion or arrows to show the process by which interactions arise) (Ryan & Stieff, 2019); students do not have sufficiently elaborated knowledge, for instance, a dynamic view of the particulate nature of matter, to include in their drawings (Cooper et al., 2017); and students do not realize that their drawings can be used to illustrate and explain the mechanisms by which the phenomenon emerge (Ryan & Stieff, 2019). Thus, the significant improvement of students' drawings suggests that the instructional strategy on drawing was helpful in assisting students with decision making regarding both which elements to include and how to represent them. Notably, it is unlikely that students create accurate and comprehensive drawings if they do not understand the conceptual elements involved (Zhang & Linn, 2011). Thus, it might be claimed that students simultaneously advanced both their ability to visually represent a chemical phenomenon and their understanding. Indeed, a significant change in the explanatory level of students' written explanations occurred.

Students' written explanations changed from mostly describing the phenomenon at the macroscopic level to discussing specific underlying mechanisms at the submicroscopic level. Further, students' explanations revealed their attempts to reason mechanistically by tracing a coherent account where they link the submicroscopic mechanisms to the emergent macroscopic phenomenon. This is a relevant finding as research consistently reports that few students consider the interactions among the entities at the

submicroscopic level (Al-Balushi, 2013; Andrade et al., 2019; Hatzinikita, Koulaidis, & Hatzinikitas, 2005; Papageorgiou, 2013; Stavridou & Solomonidou, 1998) and that few students are able to coherently connect the submicroscopic-level mechanisms with the emergent macroscopic phenomenon (Cooper, 2015; Rappoport & Ashkenazi, 2008; Talanquer, 2010).

Therefore, our results support extant research showing that drawing might work as a tool for assisting with the construction of scientific explanations with a high explanatory level (Ainsworth et al., 2011; Cooper, 2015). In particular, results showed that elements, such as motion and interactions, which are essential in detailing the mechanisms underlying the phenomenon, were significantly more associated with high-level explanations after the instruction than before. Before the instruction, the majority of students were able to draw matter as discreet submicroscopic entities, although most of the students who created these drawings did not incorporate this submicroscopic view of matter in their explanations. Indeed, before the instructional strategy students' written explanations were merely descriptions of what happened at the macroscopic level. It is possible that, prior to the instruction, some students may have been producing accurate submicroscopic representations because they were simply mimicking a representation that they had learned or memorized with little understanding of the conceptual elements represented and how they work in producing the phenomenon. For example, a typical representation that students drew before the instruction was a static representation of the particles of sugar dispersed through particles of water (or with a water background), which corresponds to the type of representation that can be seen in their textbook. This might suggest that, before the instruction, students were creating drawings with little understanding of the relationship between their drawings and the phenomena that they were intending to explain. This explanation is consistent with other studies (e.g., Cooper et al., 2017; and Kelly & Jones, 2008). For example, in their study, Kelly and Jones (2008) showed that students were able to reproduce a visualization that they observed of salt dissolving in water but that they could not use it to explain a related phenomenon. Therefore, accurate submicroscopic drawings disassociated from their verbal explanations lack meaning and indicate a superficial understanding of chemical phenomena (Ardac & Akaygun, 2005; Chang et al., 2014). After instruction, students' drawings and explanations were more associated with each other, particularly concerning the elements, motion, and interactions. More students created drawings that did not focus only on structure, but also depicted the mechanisms by which particles in the system interact. Consistently, students who presented such drawings were also able to present written explanations with a higher explanatory level in which they related the fact that they cannot see the sugar in water to the fact that sugar and water particles move incessantly, managing to disperse between empty spaces. This association between students' drawings and written explanations, found after the strategy on drawing,

suggests that students were creating drawings that reflect their own understanding of the conceptual elements represented, and that they were more likely to make sense of their drawing and to use it to articulate and reason the underlying mechanisms, and thus were more likely to construct a logical and coherent account for how and why the phenomenon happened. And, indeed, connecting submicroscopic drawings to the phenomenon is critical, and whether or not students are able or unable to make the connection indicates whether or not they have developed an adequate understanding of the concepts (Chang et al., 2014; Kzoma, 2003). Therefore, it can be argued that the strategy of drawing was determinant of such improvement.

Importantly, in this study, drawing was purposefully integrated into instruction. Rather than being an isolated exercise, drawings were deployed as an activity that supported students' observational descriptions, their reasoning of the mechanisms at the submicroscopic level, and finally their construction of scientific explanations that connected the submicroscopic-level mechanisms back to the observed phenomenon. Consistently, extant research has shown that it is not the act of drawing itself that produces the ultimate benefits for learning, but rather it is how drawing is integrated into the instructional strategies and the purposefulness and process by which students created their drawings (Ainsworth et al., 2011; Cooper et al., 2017). A particularly significant aspect was students' opportunity to interact with their drawings. Indeed, when students are prompted to interact with their own drawings they are encouraged to consider both the adequacy of their representation to their current ideas as well as the adequacy of the representation to the phenomena they are attempting to explain (e.g., Chang et al., 2014; Prain et al., 2009; Schwarz et al., 2009). Thus, the current study is important in adding to the extant literature (Cooper et al., 2017) for showing that when drawing is integrated in instruction it enables students to generate drawings with a detailed representation of mechanisms and to use their drawings to construct scientific explanations at a higher explanatory level.

## CONCLUSIONS

Drawing has been highlighted as an important tool for learning chemistry. Its benefits seem to be not only associated with the act of drawing but also how the drawing activity is integrated into classroom instruction (Cooper et al., 2017). This study strengthens the argument for the integration of drawing when constructing scientific explanations in science education. Yet, the design of the current study makes it difficult to disentangle this relation. Thus, questions remain about how the interaction between the construction of scientific explanations and the generation of drawings works. Future work is needed for clarifying such a process. It is contended that fine-grain qualitative analysis of students' discourse and practices with drawings and explanations would be useful for examining this iterative process and its underlying mechanisms when constructing a scientific explanation.

## REFERENCES

- Akaygun, S. (2016). Is the oxygen atom static or dynamic? The effect of generating animations on students' mental models of atomic structure. *Chemistry Education Research and Practice*, 17, 788- 807. <https://doi.org/10.1039/c6rp00067c>
- Al-Balushi, S. M. (2013). The Effect of Different Textual Narrations on Students' Explanations at the Submicroscopic Level in Chemistry. *Eurasia Journal of Mathematics, Science & Technology Education*, 9(1), 3-10. <https://doi.org/10.12973/eurasia.2013.911a>
- Andrade, V., Freire, S. & Baptista, M. (2019). Constructing Scientific Explanations: a System of Analysis for Students' Explanations. *Research in science education*, 49, 787-807. <https://doi.org/10.1007/s11165-017-9648-9>
- Ardac, D., & Akaygun, S. (2005). Using Static and Dynamic Visuals to Represent Chemical Change at Molecular Level. *International Journal of Science Education*, 27(11), 1269-1298. <https://doi.org/10.1080/09500690500102284>
- Ainsworth, S., Prain, V., & Tytler, R. (2011). Drawing to learn in science. *Science*, 333, 1096-1097. <https://doi.org/10.1126/science.1204153>
- Becker, N., Noyes, K., & Cooper, M. (2016). Characterizing students' mechanistic reasoning about london dispersion forces. *Journal of Chemistry Education*, 93, 1713-1724. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.6b00298>
- Braaten, M., & Windschitl, M. (2011). Working toward a stronger conceptualization of scientific explanation for science education. *Science Education*, 95(4), 639- 669. <https://doi.org/10.1002/sce.20449>
- Chang, H. Y., Quintana, C., & Krajcik, J. (2014). Using Drawing Technology to Assess Students' Visualizations of Chemical Reaction Processes. *Journal of Science Education and Technology*, 23, 355- 369. <https://doi.org/10.1007/s10956-013-9468-2>
- Chi, M. T. H., (2009). Active-constructive-interactive: a conceptual framework for differentiating learning activities. *Topics in Cognitive Science*, 1, 73-105. <https://doi.org/10.1111/tops.12285>
- Cohen, L., Manion, L., & Morison, K. (2007). *Research methods in education*. Routledge.
- Cooper, M. M. (2015). Why Ask Why? *Journal of Chemistry Education*, 92, 1273-1279. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.5b00203>
- Cooper, M. M., Stieff, M., & DeSutter, D. (2017). Sketching the invisible to predict the visible: From drawing to modeling in chemistry. *Topics in Cognitive Science*, 9, 1-19. <https://doi.org/10.1111/tops.12285>

- Hatzinikita, V., Koulaidis, V., & Hatzinikitas, A. (2005). Modeling Pupils' Understanding and Explanations Concerning Changes in Matter. *Research in Science Education*, 35, 471-495. <https://doi.org/10.1007/s11165-004-8321-2>
- Kelly, R. M., & Jones, L. L. (2008). Investigating Students' Ability To Transfer Ideas Learned from Molecular Animations of the Dissolution Process. *Journal of Chemistry Education*, 85, 303-309. <https://doi.org/10.1021/bk-2016-1235.ch007>
- Kozma, R. B. (2003). The material features of multiple representations and their cognitive and social affordances for science understanding. *Learning and Instruction*, 13, 205-226. [https://doi.org/10.1016/S0959-4752\(02\)00021-X](https://doi.org/10.1016/S0959-4752(02)00021-X)
- Kozma, R., & Russell, J. (2005). Students becoming chemists: Developing representational competence. In J. K. Gilbert (Ed.), *Visualization in science education* (pp. 121-145). Springer. <https://doi.org/10.1007/1-4020-3613-2>
- Krist, C., Scahwarz, C. V., & Reiser, B. J. (2018). Identifying essential epistemic heuristics for guiding mechanistic reasoning in science learning. *Journal of Learning Sciences*, 28(2), 160-206. <https://doi.org/10.1080/10508406.2018.1510404>
- Leenaars, F. A. J., van Joolingen, W. R., & Bollen, L. (2013). Using self-made drawings to support modelling in science education. *British Journal of Education and Technology*, 44(1), 82-94. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8535.2011.01272.x>
- Lincoln, Y. S., & Guba, E. G. (1985). *Naturalistic Inquiry*. Sage.
- McCain, K. (2015). Explanation and the nature of scientific knowledge. *Science & Education*, 24, 827- 854. <https://doi.org/10.1007/s11191-015-9775-5>
- Merritt, J. D., Krajcik, J., & Schwarz, Y. (2008). Development of a learning progression for the particle model of matter. *Proceedings of the ICLS Conference, 2008*.
- Ministério da Educação e Ciência (2013). *Metas Curriculares do 3.o Ciclo do Ensino Básico: Ciências Físico-Químicas*, Lisboa, Ministério da Educação e Ciência.
- Moreira, P., Marzabal, A., & Talanquer, V. (2018). Using a mechanistic framework to characterise chemistry students' reasoning in written explanations. *Chemistry Education Research and practice*, 20, 120- 131. <https://doi.org/10.1039/C8RP00159F>
- NRC (National Research Council) (2012). *A Framework for K-12 Science Education: Practices, Crosscutting Concepts, and Core Ideas*. Committee on a Conceptual Framework for New K-12 Science Education Standards. Board on Science Education, Division of Behavioral and Social Sciences and Education, Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/13165>



Oliveira, D. K. B. S., Justi, R., & Mendonça, P. C. C. (2015). The use of representations and argumentative and explanatory situations. *International Journal of Science Education*, 37(9), 1402-1435. <https://doi.org/10.1080/09500693.2015.1039095>

Papageorgiou, G. (2013). Can Simple Particle Models Support Satisfying Explanations of Chemical Changes for Young Students? In G. Tsapalis & H. Sevan (Eds), *Concepts of Matter in Science Education*

12 / 13

---

(319-330). Springer: Springer online.

<https://doi.org/10.1007/978-94-007-5914-5>

Parnafes, O. (2010). Representational Practices in the Activity of Student-Generated Representations (SGR) for Promoting Conceptual Understanding. *Proceedings of the ICLS Conference*CLS, 301.

Prain, V., Tytler, R., & Peterson, S. (2009). Multiple Representation in Learning About Evaporation. *International Journal of Science Education*, 31(6), 787- 808. <https://doi.org/10.1080/09500690701824249>

Rappoport, L. T., & Ashkenazi, G. (2008). Connecting levels of representation: Emergent versus submergent perspective. *International Journal of Science Education*, 30(12), 1585-1603. <https://doi.org/10.1080/09500690701447405>

Ryan, S., & Stieff, M. (2019). Drawing for Assessing Learning Outcomes in Chemistry. *Journal of Chemistry Education*, 96(9), 1813-1820, <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.9b00361>

Schwarz, C. V., Reiser, B. J., Davis, E. A., Kenyon, L., Achér, A., Fortus, D., ...(2009). Developing a learning progression for scientific modeling: Making scientific modeling accessible and meaningful for learners, *Journal of Research in Science Teaching*, 46(6), 632-654. <https://doi.org/10.1002/tea.20311>

Sevan, H., & Stains, M. (2013). Implicit Assumptions and progress variables in a learning progression about structure and motion of matter, In G. Tsapalis & H. Sevan (Eds), *Concepts of Matter in Science Education* (69-95). Springer (e-library). <https://doi.org/10.1007/978-94-007-5914-5>

Stavridou, H., & Solomonidou, C. (1998). Conceptual reorganization and the construction of the chemical reaction concept during secondary education. *International Journal of Science Education*, 20, 205-221. <https://doi.org/10.1080/0950069980200206>



Taber, K. (2018). Representations and visualisation in teaching and learning chemistry. *Chemistry Education Research and Practice*, 19, 405-409, <https://doi.org/10.1039/c8rp90003e>

Taber, K. S. (2013). Revisiting the chemistry triplet: drawing upon the nature of chemical knowledge and the psychology of learning to inform chemistry education. *Chemistry Education Research and Practice*, 14(2), 156-168. <https://doi.org/10.1039/C3RP00012E>

Taber, K. S., & García-Franco, A. (2010). Learning processes in chemistry: Drawing upon cognitive resources to learn about the particulate structure of

*EURASIA J Math Sci and Tech Ed*

matter. *Journal of the Learning Science*, 19(1), 99-142. <https://doi.org/10.1080/10508400903452868>

Talanquer, V. (2009). On cognitive constraints and learning progressions: The case of "structure of matter". *International Journal of Science Education*, 31(15), 2123-2136. <https://doi.org/10.1080/09500690802578025>

Talanquer, V. (2010). Exploring dominant types of explanations built by general chemistry students. *International Journal of Science Education*, 32(18), 2393-2412. <https://doi.org/10.1080/09500690903369662>

Talanquer, V. (2011). Macro, Submicro, and Symbolic: The many faces of the chemistry "triplet". *International Journal of Science Education*, 33(2), 179- 195. <https://doi.org/10.1080/09500690903386435>

Talanquer, V. (2018). Exploring mechanistic reasoning in chemistry, in Yeo J., Teo T. W. and Tang K. S. (ed.), *Science Education Research and Practice in Asia-Pacific and Beyond*, Singapore: Springer, pp. 39-52. <https://doi.org/10.1007/978-981-10-5149-4>

Tümay, H. (2016). Reconsidering learning difficulties and misconceptions in chemistry: emergence in chemistry and its implications for chemical education. *Chemistry Education Research and Practice*, 17, 229-245. <https://doi.org/10.1039/c6rp00008h>

Tversky, B., & Suwa, M. (2009). Thinking with sketches. In A. B. Markman & K. L. Wood (Eds.), *Tools for Innovation: The science beyond the practical methods that drive new ideas*. (pp. 75—84). New York, NY: Oxford University Press.

Wilkerson-Jerde, M. H., Gravel, B. E., & Macrander, C. A. (2015). Exploring Shifts in Middle School Learners' Modeling Activity While Generating Drawings, Animations, and Computational Simulations of Molecular Diffusion. *Journal of Science Education and Technology*, 24, 396-415. <https://doi.org/10.1007/s10956-014-9497-5>

Williams, L. C., Underwood, S. M., Klymkowsky, M. W., & Cooper, M. M. (2015). Are noncovalent interactions an Achilles heel in chemistry education? A comparison of instructional approaches. *Journal of Chemistry Education*, 92, 1979- 1987. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.5b00619>

Zhang, Z. H., & Linn, M. C. (2011). Can generating representations enhance learning with dynamic visualizations? *Journal of Research in Science Teaching.*, 48(10), 1177-1198. [https://doi.org/ 10.1002/tea.20443](https://doi.org/10.1002/tea.20443)

**Referência:** Andrade, V., Schwartz, Y., Freire, S., & Baptista, M. (2021). Students' mechanistic reasoning in practice: Enabling functions of drawing, gestures and talk. *Science Education*, 1–27, xxx-xxx. <https://doi.org/10.1002/sce.21685>.

**Informação journal:**

Journal Citation Reports (Clarivate Analytics): Education & Educational Research

Journal Impact Factor: 4.593 (2020)

Scopus: Social Sciences-Education (Q1): SJR 2.96 (2021)

### Versão dos autores

## Students' mechanistic reasoning in practice: Enabling functions of drawing, gestures and talk

Vanessa de Andrade<sup>1</sup> | Yael Schwartz<sup>2</sup> | Sofia Freire<sup>1</sup> | Mónica Baptista<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Instituto de Educação da Universidade de Lisboa, PORTUGAL

<sup>2</sup> Department of Science Teaching, Weizmann Institute of Science, Rehovot, ISRAEL

**Abstract:** Mechanistic reasoning is a powerful form of reasoning central to scientific explanations. Despite mechanistic reasoning being an important dimension of scientific practice and a central dimension of science curricula, students face difficulties in developing such type of reasoning. Many authors have been proposing tools for supporting its development; drawing is one such tool. Studies that purposefully explore how drawing leverages and supports students' mechanistic reasoning while engage in a process of constructing explanations are still scarce. The goal of the current study was to understand how students' mechanistic reasoning emerges and is enacted when students are jointly involved in drawing creation. For that, we drew on a recent framework that identifies essential characteristics of students' mechanistic reasoning and also on theories of distributed and embodied cognition. In this paper, we present a pair of middle school students who jointly explain a chemical phenomenon by creating drawings and reasoning with them. Using a fine-grain analysis we examined the elements of students' mechanistic reasoning in relation to drawing creation and how talk and embodied actions on and with the drawings were used to support students' reasoning. Findings reveal that drawings played a key role in paving the way for students reasoning about mechanisms and in enacting mechanistic reasoning. In particular, drawings were essential for pushing students to look for a mechanism, for enabling and supporting mechanistic reasoning-in-action, and for facilitating productive interactions between the students that ended up in the construction of a sophisticated mechanistic explanation.

**Keywords:** collaborative drawings, distributed reasoning, embodied actions, mechanistic reasoning, scientific explanations.

## 1 | INTRODUCTION

Current science education reform efforts (NRC National Research Council, 2012) have called for the practice of constructing scientific explanations. Through this practice, students engage in mechanistic reasoning, that is, in systematic reasoning about the underlying factors and relationships that give rise to a phenomenon to explain how and why it occurs (Krist et al., 2019). To achieve such complex reasoning students must be provided with tools (De Andrade et al., 2019; Braaten & Windschitl, 2011; Cooper, 2015; Mathayas et al., 2019). In this paper, we focus on drawing as such a tool. We are specifically interested in drawings that students jointly create in an attempt to understand and explain a natural phenomenon.

The importance of drawing for the scientific practice (Lynch & Woolgar, 1990) and the growing recognition of drawing as a powerful tool to learn science (Ainsworth et al., 2011; Chi & Wylie, 2014; Forbus & Ainsworth, 2017) have recently inspired a number of studies in science education, in different content domains and learning-teaching environments. These studies have shown the potentialities of drawing for reasoning an argument (Tytler et al., 2020), understanding difficult domains (Cooper et al., 2017), and communicating knowledge (Parnafes, 2012). Research has also shown that drawing might work as a generative tool for explaining and predicting as part of modeling learning progression (Schwarz et al., 2009). A few of these studies have identified some functions of drawing that account for these potentialities (e.g., Parnafes, 2012; Tytler et al., 2020). However, studies that intentionally explore how drawing might leverage and support students' mechanistic reasoning in the process of constructing an explanation are still scarce. It is still unclear, for example, whether and how creating a drawing pushes students' decisions to go about searching for mechanisms, or how certain elements of mechanistic reasoning emerge from students' interaction with their self-created drawings, or how drawing facilitates the interaction between students working in small groups.

Theories of distributed and embodied cognition postulate that any instance of cognition cannot be divorced from the contexts and activities in which it occurs; rather contexts, activities, and cognition form a system and are integral to one another (Hutchins, 2006; Osbeck & Nersessian, 2014; Zhang, 1997). Many instances of reasoning in science practice employ drawings or other external representations, such as diagrams, physical models, gestures (Lynch & Woolgar, 1990), which are created during a task and are central to the reasoning process. In this view, external representations are central elements of the reasoning process rather than mere aids for the generation of an internal representation (Zhang, 1997). Indeed, reasoning processes take place not only in someone's mind, but are also distributed across artefacts, participants, and their communicative actions and embodied forms of expression, such as gestures (Barsalou, 2008; Zhang, 1997). Hence, activities and their context should be analyzed as part of the cognitive activity (Hutchins, 2006; Nersessian, 2006; Osbeck & Nersessian, 2014). Accordingly, drawings created by the students for supporting the construction of mechanistic explanations should be analyzed from this perspective, that it is as a central element of the reasoning process. A large body of research in science education already focuses on drawing as a product of students' activity (e.g., Akaygun, 2016; De Andrade et al., 2021;

Cooper et al., 2017), however, to our knowledge, only a few studies assumed drawing as part of the students' reasoning process (e.g., Parnafes, 2012; Tytler et al., 2020).

Thereby, this study aims to contribute to our understanding of the role of drawing on the process of constructing a scientific explanation and particularly we aimed to address the following question: How does students' mechanistic reasoning emerge and how is it enacted when students engage in the creation of drawings? Our guiding assumptions were that when students are engaged in creating a drawing, they form a cognitive system comprising themselves, the drawings they create and their communicative and embodied actions on the drawing, and that reasoning emerges from the interaction among these elements (Hutchins, 2014). In this paper, we present a pair of middle school students who jointly explain a chemical phenomenon by creating drawings and reasoning with them. Using a fine-grain analysis we examined the elements of students' mechanistic reasoning in relation to drawing creation and how talk and embodied actions on and with the drawings were used to support students' reasoning. In analyzing the elements of students' mechanistic reasoning, we drew on a recent framework that identifies essential heuristics of students' mechanistic reasoning as a sort of practical epistemic knowledge in action (Krist et al., 2019). As this is a novel framework and has only been used to characterize students' written accounts as products of a process, we see our study as providing an important empirical contribution as it explored how these essential heuristics are used in-process when students jointly attempt to explain a target phenomenon.

## 2 | MECHANISTIC REASONING AND MECHANISTIC EXPLANATIONS

From many forms of explanations, mechanistic accounts are a hallmark of science activity (McCain, 2015; Strevens, 2008). Mechanistic explanations go beyond the description of observable behaviors and patterns. They are sought to provide a detailed description of the underlying factors and the relations and interactions between them. In this way, mechanistic explanations offer an account for how actual phenomena happen (Machamer et al., 2000), offering a unique explanatory force across domains (McCain, 2015). The importance of understanding mechanisms in science has not escaped the attention of science education. The current reforms across education for K-12 Science Education (NRC National Research Council, 2012; Next Generation Science Standards NGSS Lead States, 2013) outline constructing explanations as one of the eight science practices and call for integrating mechanistic thinking as a crosscutting concept essential to this practice (Quinn, 2016). As students reason about the possible mechanisms that account for a phenomenon, they do not simply learn facts; they also engage in figuring out what is going on that underlies these facts (Braaten & Windschitl, 2011; McCain, 2015; Talanquer, 2018a). In this way, mechanistic reasoning is a productive way of thinking that provides anchorage for students to make progress in constructing explanations of phenomena.

Scientists use a number of mechanistic reasoning strategies to guide their work in constructing mechanistic explanations (Craver & Tabery, 2015). Studies on the area of philosophy of science have made attempts to carefully characterize these strategies (e.g., Bechtel & Abrahamsen, 2005; Machamer et al., 2000). Based on these accounts a few frameworks with the goal of examining how students construct explanations have been proposed (e.g., Russ et al., 2008; van Mil et al., 2013). For instance, Russ et al. (2008) developed a coding scheme that defined the structural components that together create a mechanistic account. Drawing on the work of Russ et al. (2008) and on the idea of thinking in levels (Wilensky & Resnick, 1999), Krist et al. (2019) proposed a framework to identify and characterize the essential elements of students' mechanistic reasoning that can guide them when they are constructing mechanistic explanations. The framework is called the essential epistemic heuristics for mechanistic reasoning (EEHMR). The novelty of this framework lies on the idea of epistemic heuristics, which are essential to reasoning mechanistically about phenomena across different domains (Krist et al., 2019). Authors see epistemic heuristics as a form of strategic knowledge instantiated in practice, as opposed to explicit knowledge that guides and directs the process of constructing a mechanistic account. Thus, instead of having a set of rules that students follow as a procedure, these heuristics proceed from students' implicit ideas about the nature of mechanisms, on

which they rely on intuitively while they attempt to make sense and explain phenomena. Moreover, by conceptualizing the essential elements of students' mechanistic reasoning as epistemic heuristics, the authors aim to focus on how students think and how these epistemic heuristics could be helpful in guiding them to construct mechanistic accounts, instead of focusing on the elements that make the end result structurally mechanistic. The EEHMR framework allows to analyse students' alignment with mechanistic reasoning even when they develop noncanonical accounts (Krist et al., 2019). In being able to observe the epistemic heuristics in students' accounts, even when they are struggling with the concepts, we are actually capturing their epistemological efforts.

To examine how students' mechanistic reasoning emerges and is enacted when students are engaged in the joint creation of drawings for explaining a target phenomenon, we need to be able to capture elements in the students' practice that indicate they are engaged in constructing mechanistic accounts and to be able to characterize their naturally occurring ways of thinking. We also want to be able to capture the essential elements of students' mechanistic reasoning as evidence of their attempt to develop a mechanistic account regardless of the "correctness" of the content knowledge they have used. For these reasons, we find the EEHMR framework appropriate for the present study.

### 3 | METHODS

#### 3.1 | Data collection

The present study is a detailed case-study focusing on the observation of one pair of 8th-grade students, aged 14–15, Iris and Raul (pseudonyms), who jointly created drawings at different scalar level while they were trying to explain a chemical phenomenon. The phenomenon under explanation was the reaction of an antacid (i.e., pills of calcium and magnesium carbonate) to neutralize stomach's acidity (hydrochloric acid). Participants attended a three-day workshop on chemical changes led by two of the authors of this study. Parents were informed about the study and the procedures in workshop and gave their informed consent. Data were drawn from the first 90-min session of the workshop, where Iris and Raul working together:

1. created a first phenomenon-level drawing representing their ideas about what happens when someone takes an antacid pill to relieve heartburn;
2. created a first particle-level drawing representing what they imagine is happening at the level of particles that gives rise to the phenomenon they had illustrated previously;
3. observed the simulation of the target phenomenon in a lab-activity, where the reaction of calcium and magnesium carbonate with the hydrochloric acid solution was performed to simulate the reaction of the antacid pill and the stomach's acidity;
4. created a second phenomenon-level drawing illustrating what they had observed in the reaction simulated;
5. created a revised version of the initial particle-level drawing representing any changes or new elements that they have considered as relevant regarding what they have observed.

Following steps 2 and 5, participants were stimulated to use their drawings to explain how and why the target phenomenon occurs. On this moments, one of the researchers who led the session encouraged students to go further in their explanatory accounts with prompting questions, such as How do you think this happen? Why is it happen that way? Except for these two moments during the session, the researchers reduced their interventions to a minimum; they only intervened to structure the session (for instance, to introduce information needed to perform the tasks) and to make any clarifications when needed.

To assist in the creation of the drawings, students were provided with a schematic template with three frames, each one corresponding to a stage of the reaction—before, during, and after. The goal of providing

students with this template was to extend drawings from space to time, stimulating students to represent change over time (Tversky & Suwa, 2009). This is important because we wanted to capture students' reasoning about the mechanisms that account for how a process proceeds. In addition, since we aimed to stimulate interactions for capturing students' reasoning processes, we provided the minimum amount of information regarding the creation of the drawings. By doing this, students had to decide which elements to represent in their drawings and how to visually represent them in space and through time. To create the particle-level drawings students were asked to imagine they could see the smaller parts that make up matter and to draw what they would see happening in each frame (before, during, and after the reaction). Students were not provided with information about the chemical composition or structure of the substances involved in the reaction, since we were interested in examining students' reasoning about the mechanism of how a reaction happens. In mechanistic explanations systems can be conceptualized based on the dynamics of entities in the system and on the consequences of their relative positions and motion; the detailed chemical composition of the entities that comprise the system is not actually needed to reason about how entities in the system interact and behave (Talanquer, 2018b). Regarding students' school-level, a mechanistic account for how a chemical reaction happens can be provided using the idea of random collisions between interacting particles and spatial rearrangements through interactions.

The pair's interaction along the session was video-recorded for the purpose of this study, and the artefacts they produced were collected and digitalized. The first author then transcribed the complete video record for participants' verbal and nonverbal interactions (every action performed on and with the drawing was carefully described) to enable a fine-grained analysis of the interaction.

## 3.2 | Data analysis

The analysis is focused on the interaction that emerged when students were creating the first and the second particle-level drawing (steps 2 and 5) and in the discussion that followed it.

To identify and characterize students' mechanistic reasoning, we used Krist et al. (2019) framework of the essential epistemic heuristics for mechanistic reasoning [EEHMR]. The following list summarizes the essential epistemic heuristics for mechanistic reasoning (Krist et al., 2019).

*Heuristic 1: Thinking across scalar levels*, that is, considering what occurs at the scalar level below the level of the target phenomenon. Indicators that students considered multiple scalar levels, were: whether students described an element of the phenomenon at the scalar level below that of the observed phenomenon, or whether they used an abstract factor to account for some aspect of the phenomenon.

*Heuristic 2 A: Identifying factors*, that is, identifying the things that need to be reasoned about. Indicators of such heuristic were: whether students named or mentioned any one of the following factors: entities, either concrete (e.g., particles) or abstract (e.g., the collisions); properties of entities or of systems; or rules associated with the entities of a system.

*Heuristic 2B: Unpacking factors*, that is, characterizing factors' behaviors, interactions, and effects. Indicators of such heuristic were: whether students described why the identified factors matter or how they work to produce the target phenomenon. Depending on the identified factor, students could have unpacked the following: behaviors and interactions among key entities of the system; and the effect of those interactions on the properties of the entities.

*Heuristic 3: Linking*, that is, coordinating how the unpacked factors give rise to the observed phenomenon. Indicators of such heuristic were: whether students made connections between observed phenomenon and the factors at the level below.

The three essential epistemic heuristics for mechanistic reasoning were organized according to three levels of progressive complexity, where thinking across scalar levels (Heuristic 1) is the least complex heuristic and linking (Heuristic 3) is the most complex. This organization allows for characterizing students' progression with developing a mechanistic account. The more heuristics and the more complex they are, the higher is students' degree of alignment with constructing a mechanistic account (Krist et al., 2019).

The unit of analysis was a conversational turn in students' interactions. A conversational turn begins when one of the students takes the floor in the conversation and ends when the other student takes the floor. It comprises both students' talk and actions. It must be noted that a single turn may include one heuristic, more than one heuristic, or none at all. Furthermore, the identification of heuristics does not consider the "correctness" of the scientific ideas (e.g., indicators of a student using the heuristic *identify factors* or *link* can be found, even when they use noncanonical factors).

To explore the functions of drawing in the process of constructing a mechanistic explanation, all students' actions performed on and with the drawing were analyzed. The analysis followed an iterative process based on Wardak (2017). First, to complete the transcription, the video records were re-watched and any observed action performed on and with the drawing was highlighted in the transcription using a set of conventions. Second, a description of the actions performed on and with the drawing was added in a separate column. Third, the description of these actions was reviewed and categories were developed based on relevant literature (e.g., Mathayas et al., 2019; Parnafes, 2010; Wardak, 2017). Finally, categories were used to code every described action performed on and with the drawing. Categories are as follows:

Pointing gestures (*P-Gestures*): Gestures with no representational function, such as pointing to any element or part of the drawing.

Representative gestures (*R-Gestures*): Gestures with a representational function, such as animating with the hands the elements of the drawing to depict elements' properties and its actions or relationships among them.

Gaze: Looking at the drawing for a moment.

Drawing: Sketching or making any kind of marks on the drawing, such as adding or deleting an element, selecting some element in the drawing or highlighting it by making a mark or inscription.

The entire transcripts with the analysis of the students' heuristics and actions performed on the drawings is presented in the appendix.

The next section presents the findings of this analysis organized in six thematic episodes, selected from two parts of the session. For each episode, we describe what students did, identify the elements of their mechanistic reasoning and unpack the role of drawing. Part A, comprising episodes 1 to 4, took place when students were engaged in creating a first particle-level drawing before they had the opportunity to observe the target phenomenon. Part B, comprising episodes 5 and 6, took place when students were challenged to revise the initial particle-level drawing after observing the target phenomenon. The six episodes were selected since they represent key moments of the students' engagement and progression in mechanistic account construction and excerpts of the transcripts were used to illustrate our analysis. The quotations of students' talk appears alongside with the snapshots of the video illustrating their actions on the drawings. Whenever quotations are underlined, it means that students' talk occurs simultaneously with an action on the drawing.



## 4 | FINDINGS AND DISCUSSION

### 4.1 | Episode 1—Outlining an initial sketch of a mechanism

Initially, Iris and Raul had created a drawing at the phenomenon-level to illustrate what happens when someone takes an antacid pill to relieve heartburn (Figure 1, Appendix). After completing the drawing, they were asked to create a new drawing, this time for representing what would be happening at the level of particles (A1, Appendix). This episode shows how, in response to this prompt, Raul outlined an initial sketch of a mechanism and how Raul's interaction with the drawing functioned to guide and organize his reasoning.

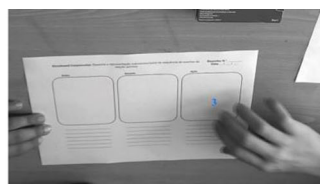
After a brief moment, where Iris and Raul looked back and forth between the created drawing and the new drawing sheet (A2, Appendix), Raul spontaneously started talking while gesturing over the drawing-sheet:



A3 Raul: <sup>1</sup>*Well, we have to draw a molecule* ((points to the before-reaction frame))



<sup>2</sup>*and then another molecule coming and hitting* ((points towards the during-reaction frame))



<sup>3</sup>*and doing new things* ((after-reaction frame)).

#### 4.1.1 | Elements of mechanistic reasoning

Raul's initial account indicates he was thinking across scalar levels as he acknowledged that substances involved in the reaction (the acid and the antacid pill) are made up of smaller parts (molecules). Having moved down to the level of particles, he then started reasoning how these smaller parts behave to produce the target phenomenon. In doing so, he identified a causal factor ("hitting"), and he unpacked the effect of this factor on the key entities ("doing new things").

Raul's account represents a simplified version of a mechanism, resembling to what Darden (2002) calls a mechanism sketch. A sketch of a mechanism specifies only a few key factors, leaving gaps that cannot be filled in yet; but, that offers a way of thinking (Darden, 2002). Raul knew from his chemistry lessons that substances react and originate new ones, and he might have drawn on this knowledge to sketch an initial mechanism. This initial sketch of a mechanisms left open the need for identifying and unpacking factors that would fill in the gaps. For instance, Raul did not identify which property of the lower-level entities caused them to collide, assuming that they merely collide, nor specify the process by which entities, interacting with each other when they collide, "do new things." He also remained ambiguous regarding the nature of those "new things." For example, it is not clear whether these "new things" are the same chemical entities that suffer some sort of change on some "material" property or whether these "new things" are new chemical entities with a new chemical identity. Nevertheless, this initial sketch of the mechanism was an important initial step as it offered a way of thinking about the reaction as a process where somehow lower-level entities interact and "do new things." In other words, it placed "the phenomenon in a category of things" (Krist et al., 2019, p. 29), which is an essential step when reasoning about mechanisms. From this point on, Iris and Raul's work was to provide further detail to the initial sketch of the mechanism.

### 4.1.2 | Unpacking the role of drawing

This episode illustrates an example of the affordances of creating a scalar level drawing as a productive starting point for searching for a mechanism. By asking students to produce a particle-level drawing, we were stimulating them to move down to the particle level, that is, to use the first essential heuristics for mechanistic reasoning. In this case, we found Raul focusing his attention on mechanistic aspects of the target phenomenon, as he started thinking about the entities inside the acid and the antacid pills and imagining how they interact and what they do. Thereby, creating a scalar drawing, which directed thinking across scalar levels—an essential but nontrivial step for students at this school-level (Papageorgiou, 2013)—, produced a fertile environment for questioning about how things work, in other words, it worked as starting point for reasoning about mechanisms (Krist et al., 2019).

Importantly, Raul's actions on the drawing-sheet may have guided and helped organizing his reasoning. In this example, Raul used gestures over the different frames in the drawing-sheet to convey the temporal sequence of the processes (before, during, and after). According to several authors (e.g., Barsalou, 2008; Hutchins, 2006; Krueger, 2012), action in the material environment favors the emergence of a complex interactional space, where reasoning not only occurs in the individual's mind, but it is distributed in the interaction of the individual within the material space where he/she is acting. Thus, even before students had started to inscribe things on the paper, the drawing-sheet, with its particular qualities, was already working as a material space for action. We suggest that Raul's talk coordinated with his spontaneous actions on the temporal frames of the drawing-sheet might have not only worked to express his mental model of the mechanism, but also to be part of a reasoning-in-action process regarding what was going on in each frame. The material space of the drawing-sheet with its particular qualities may have shaped Raul's reasoning and, indeed, the model of the mechanism generated may have been different from any model that had been developed only mentally (Nersessian, 2006).

## 4.2 | Episode 2: Deriving a shared meaning from Raul's initial sketch

Thus far the two students had agreed in Raul's initial sketch of the mechanism (molecules colliding doing new things). However, as they moved on representing what was going on in the during-reaction stage, it turned out that they were not exactly talking about the same type of change, since they had divergent views on the nature of the entity “new things.” This episode shows how drawing and embodied actions on the drawing worked to bring up this divergence, helping students to derive a shared meaning.

At this point, students had already decided on the structure of the entities that made up the antacid pill and the stomach acid and they had agreed how visually represent them (A4–A19, Appendix). When moving on to draw the during-reaction stage, Iris suggested drawing the acid molecule in different sizes: during-reaction acid molecules should have the same size as in before-reaction, but it should be smaller after-reaction:

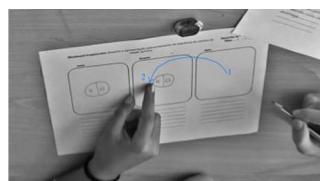
A20      Iris: *Now, we have to draw it [the acid molecule] like this one (.) the same size*  
(circles the acid molecule—represented as “H-Cl”—in the before-reaction frame)).



A21 ((Raul starts drawing in the *during-reaction* frame a new "H-Cl" molecule, similar in size and shape to the one drawn in the *before-reaction* frame))

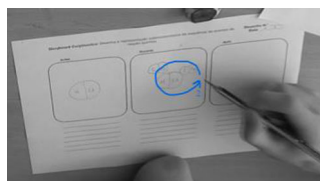


A22 Iris: <sup>1</sup> in the other ((points towards the after-reaction frame)) <sup>2</sup> this H-Cl ball ((points to the entity "H-Cl" that Raul has just drawn in the during-reaction frame)) *you draw it smaller.*



Although Raul firstly drew as suggested, he overlooked Iris last indication. Instead, he proceeded drawing the entities of the antacid in the during-reaction frame (A23–A28, Appendix). On finishing to draw the antacid's entities, Raul mentioned that those entities collide with a gesture to represent the collision (A29). His action caught Iris's attention, to which she immediately reacted. Building on Raul's gestures, Iris enacted with a shrinking gesture the effect of the collision in the acid molecule (A30).

A29 Raul: They collide with each other ((makes a circular gesture with the pencil, over the entities ["C-Mg", "H-Cl", and "C-Ca"] to represent them as colliding))



A30 Iris: *And this one* <sup>1</sup> ((positions his hand over the acid molecule ["H-Cl"] in the *during-reaction* frame))



shrinks <sup>2</sup> ((gestures "shrink" by closing her hand)).



Though Iris had mentioned before (A22) that acid molecules get smaller after-reaction, it was only after this sequence of gestures that Raul realized Iris' idea and he disagreed. On being aware of Iris' idea of how acid molecules change, he explained that molecules change forming new ones (water) and he proceeded to draw the new molecule:

A31 Raul: *No, I don't think they shrink they originate new things. It's water, It's H-2-O* ((draws the entity "H-O-H" in the after-reaction frame))



A32 Iris : *Look this is* ((leans over the drawing and attentively looks at it for 8 seconds)) *Ah! So, I see!* *I see, so it also originates a salt, that is...*

After this, Iris had an “Aha!” moment (A32, Appendix). She realized that the acid molecules do not shrink, but rather that new things are originated. It is interesting to note that she did so after 8 s of quietly observing the drawing.

#### 4.2.1 | Elements of mechanistic reasoning

In this episode, we find Iris thinking across scalar levels as she considered that something must have changed in the lower-level entities to account for the decrease of stomach acidity. She identified size as a key property of the acid molecules and proposed how this property would change over time (“it gets smaller”) causing acidity to decrease. Then drawing on the causal factor proposed by Raul (collisions), she unpacked how size (a key property) changes (“acid molecule shrinks due to collisions”). Clearly, the shrinkage of molecules is a noncanonical property; yet she drew on a familiar yet abstract everyday idea to account for what was going on at the level of particles that could account for the phenomenon behavior (less acidity). Thereby, Iris was reasoning mechanistically even in the absence of the specific disciplinary knowledge regarding how the properties of matter change in a chemical reaction. However, Raul realized that Iris's idea did not fit his view of “new things” as new entities, with a new chemical identity. According to his thinking, the “new things” were not the acid molecules getting smaller, but new molecules, which were different from the original ones (“It's water, it's H-2-O”). In the end, Iris adhered to Raul's account. Once their divergences were identified, the initial sketch of the mechanism became more detailed, with both students agreeing to characterise “new things” as entities with a different chemical identity.

#### 4.2.2 | Unpacking the role of drawing

This episode illustrates the affordances of representing something visually. To draw something always requires making explicit decisions about the structure of the things to draw, such as their size and shape (Nickerson et al., 2013). In this case, the drawing pushed Iris as to how she was supposed to draw the acid molecule over the reaction stages. This process requires developing a mental model for how a particular entity changes in structure and transition states (Nersessian, 2009). Iris generated a model of an acid molecule getting smaller through the reaction stages. Again, we found drawing prompting students to question how things work. In other words, to reason about mechanisms (Krist et al., 2019).

Moreover, we found students performing an integrated sequence of gestures on the drawing. Raul enacted collisions on the drawn entities and then Iris enacted the effect of collisions on the acid molecule. In this way, they were able to create a real-time animated model of a causal process. Aligned with theories on distributed cognitive processes (Nersessian, 2009; Osbeck & Nersessian, 2006), this example suggests an instance of reasoning through a model (mental and material) created and enacted in a complex and dynamic interaction between each student's

individual mental models, the drawing and their embodied actions on the drawing. Furthermore, once this model arose in the space shared by the students, one more possibility for further thought and collaboration was offered, enabling students to find flaws in parts of the mechanism, to correct it, and to further specify the initial sketch of the mechanism.

### 4.3 | Episode 3: Outlining a new piece of the mechanism

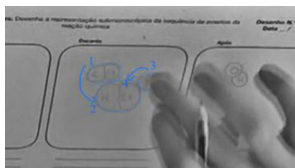
Once both students agreed on the nature of the entity “new things,” they went on to search for the composition of such entity (“a salt”) (A32). In this process, a new piece of the mechanism emerged.

While Raul began by speculating about the possible composition of the salt and tried to recall a mnemonic that he had learned at school, Iris focused her attention on the drawing, carefully inspecting the drawn entities (A33–A39, Appendix). After a while, keeping her eyes on the drawing, she began to share her ideas:

A40 Iris: (...) *I think it's something like these three will combine somehow* ((gestures over the three entities in the during-reaction frame as it they were getting together)) *to originate things (...).*



A41 Raul: *We should focus on just one* ((looks at the drawing for 5 sec.)) *Ah! No.: We have to do this one*<sup>1</sup> ((points to "C-Ca") *with this*<sup>2</sup> ((points to "H-Cl") *and this one*<sup>3</sup> ((points to "C-Mg;") *with this one*<sup>4</sup> ((points to "C-Mg" and then to "H-Cl"))).

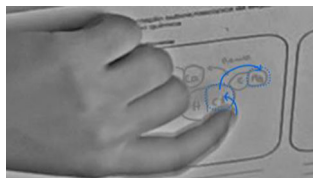


A42 Iris: Yeah!

A43 Raul: *There are two different combinations. Rennie are these two together*<sup>[1]</sup> ((Draws an arrow connecting the entities "C-Ca" with the "C-Mg" and writes "Rennie"))).



A44 Iris: *I think these two together*<sup>1</sup> ((points to "Cl" and then to "Mg")) *originate the calcium chloride; and these two*<sup>2</sup> ((points to "Cl" and then to "Ca")) *originate the magnesium chloride. But all three, I don't know*<sup>3</sup> ((makes the same gestures as in A38)).



Iris suggested that entities during-reaction combine to originate the new ones with a gesture to represent all entities combining together (A40). However, while inspecting the drawing, Raul came to a different idea, suggesting that each one of the antacid pills' components separately react with the acid molecule (A41 and A43). Iris then proceeded to convey her understanding of what Raul was proposing with pointing gestures to make reference to the entities and how they arrange (A44). Notably, her pointing gestures specifically made reference to the smaller parts of the entities (e.g., she points to "Cl" and "Mg" instead of the "all" entities "H-Cl" and "C-Mg"). However, at this point, Iris was puzzled with the fact that the antacid pills were made up of two different components instead of just one (which probably would be a more familiar situation). As she latter elaborated on (A50), she was uncertain whether each component of the antacid reacted with the acid originating two different salts, or whether the two components together reacted with the acid, with the three combining to originate just one salt:

A50 Iris : Does it originate one or two salts? <sup>1</sup>((Keeps looking at the drawing)) Will it be this with this and this with this <sup>2</sup>((points to "Mg" and then to «Cl», and then again to "Ca" and to "Cl")); or these three together? <sup>3</sup>((with her finger circles the three entities: "Cl", "Ca" and "Mg"))



Following Iris question, Raul tried to make her understand that if the antacid pills were made up of two different chemical components, each one a "different base," then each one would "neutralize the acidity":

A51 Raul : It is this one with this one <sup>1</sup>((points to "H-Cl" and then to "C-Ca")) and this one with this one <sup>2</sup>((points to "H-Cl" and then to "C-Mg")) Two separated. The two are in the same tablet.



A52 Iris: But: are the two in the same tablet? <sup>1</sup>((gestures in repeated moves over the entities "C-Mg" and the "C-Ca")) It's like a tablet of the two (...)



A53 Raul: Both of them are bases, aren't they? Both are bases...

A54 Iris: Yes, they are. ..

A55 Raul:and the two are going to neutralize the acidity (...)

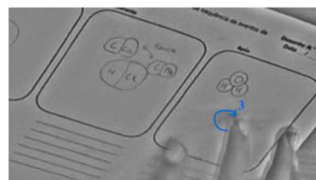
This time, Iris seemed to understand what Raul meant. She concluded that two salts originate from the reaction, making reference to the entities of interest and enacting their arrangement with gestures:

A58

Iris: *Ah! Okay! So, I think it will be the chloride with this<sup>1</sup>((Puts one finger over the "Cl" and then over the "Mg")) and the chloride with this<sup>2</sup>((repeats the gesture for the "Cl" and "Ca"))).*



*That is what I think it's magnesium chloride<sup>3</sup>((points to an empty space in the after-reaction frame)) and calcium chloride<sup>4</sup>((points to another empty space nearby.))*



### 4.3.1 | Elements of mechanistic reasoning

In this episode, we find Iris thinking across scalar levels to figure out “which salt is originated?” Unlike Raul, who started trying to recall a mnemonic, she began by carefully inspecting the drawing. This reveals her commitment to thinking about what was going on at the lower level of particles that could possibly account for what she was trying to figure out. Iris proposed a process by which the entities in the system act to “originate things” (“they somehow combine”). Next, she also identified the specific entities in the system that played a key role in the process of originating new entities (the elementary parts of the chemical entities). Finally, she unpacked how these key entities act. She proposed that these elementary parts rearrange into different structural units, which results in the new substances. In this way, Iris outlined a new piece of the mechanism by which the “new things” originate.

Meanwhile, Raul identified a new factor (“two different combinations”). This is considered to be an abstract factor, since it requires the same sort of epistemic work as reasoning across levels of abstractness to identify factors that describe a particular condition of the actual phenomenon (Krist et al., 2019). Notice that for these students the fact that the antacid pills are made up of two different components and that each one will react with the acid was a new idea.

### 4.3.2 | Unpacking the role of drawing

In this episode, there are some instances of students stopping and staring at the drawing when they were feeling uncertain of something, and then coming up with new or different ideas about what they were trying to grasp. We interpret these acts as moments of reasoning with the drawing, where their ideas emerged through the interaction with the drawing. The drawing as external visuospatial representation allows for direct perception of the key entities in the system that includes aspects of their structural and spatial arrangements (Bobek & Tversky, 2016). The drawing thereby provided points of stability for students to imagine possible relationships between the system's entities, without having to visualize these relationships with internal visuospatial representations (Stieff & Raje, 2010). In addition, by acting upon the drawings through gestures accompanied with talk, students were able to identify key entities and to physically simulate their relationships. As such talk and embodied actions on the drawing became a way of reasoning that allowed them to go beyond to what they could possibly do if they had only relied in internal representations (Kirsh, 2011).

To an outside observer, these conversational turns look fragmented and sometimes difficult to follow. Their talk included many deictic expressions such as “this one,” “there,” “with,” which were specified and conceptualized through actions on the drawings. When deictic expressions are enacted on the drawing and accompanied by

gesturing and pointing on it, they play an important role in the process of making sense (Park et al., 2021; Tholander et al., 2008). In this case, these expressions and gestures were important for students making sense of each other's ideas and for further unfolding their interaction.

#### 4.4 | Episode 4: Attempting to progress into a more complete mechanistic account

This episode illustrates the students attempt to progress into a more complete mechanistic account before they had the opportunity to observe the target phenomenon. During this occasion, the first researcher asked both students to look at their drawings and to further explain how the entities represented in the particle-level drawing act to produce the target phenomenon. This prompt sought to bring together the many factors they had identified and unpacked across the previous episodes into a more complete account. Immediately after this prompt, Iris started to say something (A61), but she was interrupted by Raul who explained that the “molecules” collide (A62). Iris immediately agreed (A62):

A61 Iris : Is that =

A62 Raul: = Collide. (2) Because they collide with each other ((gestures of colliding over the table, besides the drawing, by opening and closing his hand)).



A63 Iris: collide, yeah!

Given students' apparent satisfaction with Raul's response, the researcher made another attempt to push students thinking (“But, how does it actually happen?”); and Raul quickly started gesturing over the drawing to show that particles are moving.

A65 Raul: Because the particles are in constant movement. They are constantly moving ((waves his hand over the drawing to represent particles in motion)).



Once again, Iris agreed with Raul and commented that this element was not shown in their drawing (A66, Appendix). Following Iris' intervention, Raul added brackets to all of the entities in the drawing to depict their motion and Iris concluded: “and that's how they react” (A68, Appendix). Since both students were satisfied with their explanation, the conversation ended.

##### 4.4.1 | Elements of mechanistic reasoning

In this episode, Raul responded to an external prompt, by confidently attributing the target phenomenon to the collisions between entities. This seemed to be an important factor for him. He had identified collisions as a



causal factor in the first episode, and had brought it back in episode two. When further prompted to consider how collisions actually happened, Raul identified the property of the lower-level entities that caused them to collide (constant and random motion). Though, indicating motion as key property of the entities of the system looks disconnected from the sense-making process that he and Iris had been engaged with. Instead, we conjecture this to be evidence of Raul negotiating of what counts as the *bottom out* (Machamer et al., 2000) for the mechanism they were attempting to construct. Descriptions of multilevel mechanisms top off in some highest-level of the target phenomenon and bottom out in some point of its underlying mechanism, beneath which more detail becomes irrelevant for what it is expected as an acceptable explanation for the target phenomenon (Craver & Darden, 2013). In other words, it is where an explanation comes to an end. In science, whether an explanation reaches the *bottom out*, depends on the interests a researcher's field and their purposes (Machamer et al., 2000). In school-science, it may depend on what is considered as an acceptable explanation regarding the students' school-level, as well as on students' understanding of what is expected from them in a particular learning situation ("what's going on here") (Kapon, 2017). In this case, when prompted to go deeper Raul might have recognized that this is where the researcher wanted them to go. Thus, he proposed particle motion as it is indeed an ubiquitous explanatory idea in science class and he might have believed it is where an acceptable explanation should *bottom out*. It is also possible that Raul had accepted particle motion as a fundamental factor or taken it to be unproblematic for their account until this point and when asked for something deeper he had decided to use it.

Ultimately, responding to an external prompt they identified what caused particles to collide and collisions as the factor by which the reaction proceeds. As such, they unpacked another detail of the initial mechanism. Notably, the students left open how the rearrangement of elementary particles, a process identified in episode 3, connects into this mechanism.

#### 4.5 | Episode 5: Engaging in a new cycle of sense making

In this episode, students were engaged in revising their particle-level drawing. Before that, they had observed the target reaction and had produced a second phenomenon-level drawing for what they observed. In this episode, students underwent a new cycle of sense making, revising their earlier ideas and developing new ones. In this process, new factors came into their attention when they revisited their earlier particle-level drawing.

After looking at their initial particle-level drawing, both students momentarily agreed that there was no need for revising it. Suddenly Iris, who had been looking back and forth between the particle-level drawing and the second phenomenon-level drawing, identified a new element ("fizzing"):

B2      Iris: *Ah! No, no, wait* ((leans over the second the phenomenon-level drawing)). *Now there is a gas* ((points to the fizzing in the 2<sup>nd</sup> version of the phenomenon-level drawing)).



Immediately after, Raul started to conjecture about which gas was that. First, he enumerated some possibilities, "Perhaps hydrogen?" (B3, Appendix); "Perhaps carbon dioxide?" (B5, Appendix), but then he asked "What's in the tablets?" (B7, Appendix). At this point, he directed his attention to the drawing and he noticed the two "C" particles in the entities representing the antacid pill:

- B9 Raul: ((Stares at the 1<sup>st</sup> version of the particle-level-drawing))  
*Ah! So, there are two carbons. These two* ((points to the two "C" particles in the representation of the entities of the antacid, "C-Ca" and "C-Mg")).



In turn, Iris completed Raul's idea by saying there is "also an oxide from the base" (B10, Appendix), and then Raul concluded "and the dioxide has two oxides of carbon" (B11, Appendix). Seemingly, Raul had inferred the composition of the unknown gas as carbon dioxide from the visual representation of the "C" particles of the antacid entities. Afterwards, Iris started to wonder whether something was missing in the antacid entities. She wondered whether bases always have hydroxy ("O-H") and that, if the components of the antacid pill were bases, then their entities should somehow have hydroxy:

- B12 Iris: *They always have a hydroxide* ((looking at the 1<sup>st</sup> version of the particle-level-drawing)) *but we didn't draw it here* ((Puts his finger over the entity "C-Ca" in the during-reaction frame)).



Apparently, this missing elements struck Iris attention, and a few turns later, when Raul was drawing the water molecule, in the revised particle-level drawing (A19, Appendix), the "O" particle in it caught her attention. Thus she pointed to it and questioned: "where does it come from?":

- B13 Raul: ((Stares at the 1<sup>st</sup> particle-level-drawing for 10 seconds))  
*So, one of the bases is carbonate* ((points to "C")) *and calcium...* ((points to "Ca")).

- B15 Raul: *So, this means that the calcium and the magnesium separate* <sup>1</sup>((points to the entities "Ca" and "Mg")) *separate* <sup>2</sup>((makes a gestures as the two particles are moving apart)), *and with the chloride* <sup>3</sup>((Points to the entity "Cl")) (...) *Ah! I see, I see. It's calcium with the chloride and with the magnesium* <sup>4</sup>((points with the pencil to the entity "Ca" and then to the "Cl", again to the "Cl" and then to the «Mg»))  
*Magnesium chloride! Ah! Okay, Okay... It is that, why...*



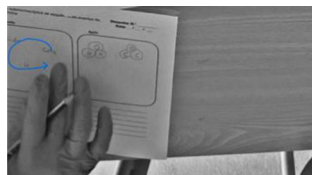
It is interesting to note that, though the molecule of water had been drawn in the earlier version of the particle-level drawing, only now did it capture Iris' attention. Raul then making a loosely gesture over the entities represented in the during-reaction frame suggested that the "O" particle may have come from there (B21). Still uncertain, Iris inspected the drawing once more and then concluded that "carbonate isn't the only C. But maybe something else like COH" (B22). On the basis of this suggestion, Raul moved his attention to the drawing as though he was trying to make sense of what Iris was proposing. He then ended up accepting Iris' suggestion and added an "OH" to each "C" of the antacid entities (B23).

As this interaction was developing, Raul was making other progresses. It occurred after inferring the unknown gas from the “C” particles of the antacid entities (B9) and after Iris suggesting that something was missing there (B12). In the following excerpt, Raul's interaction with the drawing is an evidence of a sense making process:

- B20 Iris: *But: what about this O?* ((points to "O" in the representation "H-O-H" that Raul has just drawn)) *Where does it come from?*

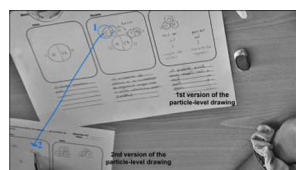


- B21 Raul: *It must be from here* ((moves his hand over the entities represented in the *during-reaction* frame)).



- B22 Iris: *I don't know how it is* ((stares at the particle-level drawing for 8 seconds)). *Perhaps, it's because the carbonate isn't only C. But maybe something else like COH.*

- B23 Raul: *No, if... carbonate... that is, this one here is CHO!*  
<sup>1</sup>((points to the C particle in the representation of the antacid entity "C-Ca")) *Hmm::* <sup>2</sup>((inscribes "OH" next to the particles "C" in the representation of the antacid entities)).



His explicit pointing gesture to each elementary part of the antacid entity (“C” and “Ca”) suggests a recognition of these smaller parts as key entities (B13). This idea had not been as evident for Raul until now as it had been for Iris since episode 3. Raul then continued on and enacted these two particles going apart, saying that they “separate” (B15). After that, he considered that they reconnect differently and continued reasoning how. Raul expressions, such as “Ah! I see,” and “Okay... It is that, why...” suggests that he finally understood something. Notably, Raul's reasoning was tracked with gestures on the drawing. The idea that smaller parts that made up the entities of the system separate and reconnect into new ones seemed as a meaningful idea for him and he revisited this idea later:

- B25 Raul: It means that after, these get out <sup>1</sup>((makes a gesture like the two particles were moving apart))



Raul's words “it means that” suggested that he was able to make sense of something. Moreover, he again enacted the action “separate.” After few more exchanges (B26–B35, Appendix), they ended up concluding:

B36 Iris: *It is this plus this and this plus this*<sup>1</sup>((points to "Ca" and then to "Cl", then points to "Mg" and back again to "Cl")).  
*The H-Cl reacts with the two bases this one and this one*<sup>2</sup>((points to "Ca-C" and "Mg-C")). *So, we have to draw them here*<sup>3</sup>((points toward the after-reaction frame)) *and that's it.*

It is interesting to note that Iris now confidently proposed that "the H-Cl reacts with the two bases" suggesting that she understood what Raul had proposed in episode 3 as "two different combinations." We suggest that while revisiting their drawings to consider a new element of the phenomenon Iris and Raul had achieved a sense of understanding.

#### 4.5.1 | Elements of mechanistic reasoning

In the phenomenon-level drawing Iris identified a new element ("fizzing"). On considering it, Raul questioned about "What are the antacid pills made of?" By doing this, he recognized the need to search for something deeper and he moved down a scalar level to figure out what was there that could have originated the unknown gas. Having moved to the lower-level of particles Raul identified the "C" particles in the entities that made up the antacid pills as key entities, and considered that the unknown gas might have emerged from these entities. Instead of simply taking the "fizzing" as something that pops up when the acid and the antacid pill react, Raul thought about the unknown gas (an observable element) by considering what was going on at a lower scalar level. This way of thinking indicates students' commitment to search for mechanisms (Krist et al., 2019). In addition, Raul proposed how the entities interacted as they combined with one another. Hence, he proposed that these elementary parts (key entities) separate from each other and reconnect into different arrangements. Raul was unpacking how entities rearrange—the process that Iris had proposed in episode 3. In other words, he made sense of a piece of the mechanism introduced earlier, which he then unpacked (i.e., described how entities act when rearrange), and thus provided further detail to the mechanism.

Moreover, in their attempt to search for how the unknown gas could have emerged from the lower-level entities, Iris started to wonder whether something was missing in the antacid entities. She noticed that some elements of the new chemical entities were not represented in the original ones, which was inconsistent with her idea that new chemical entities originate from the rearrangement of the elementary parts of the original ones. When noticing such inconsistency, and without further information, she drew on a prior intuitive rule (that bases always have hydroxy) and suggested a new entity that would work better. Clearly, the chemical composition that she ended up suggesting was still not the "correct" one, yet we find Iris searching deeper for something else, by thinking across scalar levels and the key entities in a process.

#### 4.5.2 | Unpacking the role of drawings

In this episode, comparing drawings at different scalar levels was critical for bringing up a new element of the observed phenomenon to their attention and directing them to consider what might have been going on at a lower scalar level that could have originated it. For instance, the phenomenon-level drawing called attention to a salient aspect that might have gone unnoticed. And, when trying to represent this aspect (formation of an unknown gas) at the level of particles, Raul started questioning what this unknown gas is made of? And which entities in the system might have originated it? Students then went on to revisit their earlier particle-level drawing to answer these questions, and this afforded a process of sense-making.

In this process, we found Raul inspecting the drawing and thinking out loud while performing a number of gestures over the drawn entities. We see this as one more instance of distributed cognition processes (Hutchins,

2006; Nersessian, 2006), involving reasoning and student's interaction with through the drawing and the embodied action on it. As this example suggests, in a system where the spatial arrangement of the entities is crucial for understanding its mechanisms, the drawing seems to provide a material space for carrying on reasoning. By gesturing over the drawn entities, Raul enacted a sequence of actions that served to simulate their possible rearrangements during-reaction. This is considered a less cumbersome process than if it had to be carried out entirely internally (Nersessian, 2009).

Notably, the process of revising their earlier drawings seemed to be of much value. As drawing forms a stable material shared space, it can be inspected over and over. In this process, students seemed to become more familiar with the representations on the drawing, and from there, they grasped new entities and factors and inferred how they worked in the mechanism. This suggests a complementary benefit of creating and using drawings, a two-way process of externalizing and shared visuospacial representations, which can be used to scrutinize and further elaboration (Kirsh, 2011). Thus, this provides evidence for arguments elsewhere (Cooper et al., 2017; Tytler et al., 2020) that drawing may allow for and support productive reasoning cycles.

Lastly, once again, this is a good example where pointing to the entities represented on the drawing and enacting their actions, may have avoided cumbersome verbal descriptions and facilitated the ongoing turn-taking in their conversations, and thus the opportunity to bring more ideas into their conversations (Chi & Wylie, 2014) and possibly to use essential heuristics for mechanistic reasoning.

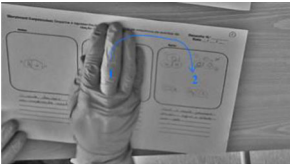
#### 4.6 | Episode 6: Integrating the many pieces into a final mechanistic account

The episode illustrates the students' final attempt to integrate the many pieces of a mechanism that they had unpacked into a more complete account. Iris and Raul were challenged to look at the different drawings they had created and to further explain how the phenomenon that they observed happened.

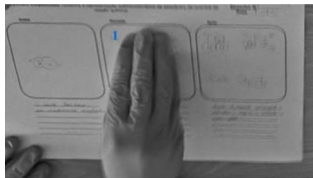
In response to the prompt, Iris started to wonder, "So::: what happened?" (B42, Appendix), while Raul quickly stated "what happened? So the acid reacts with ..." (B43, Appendix). Apparently, this was not the kind of response that Iris wanted so she interrupted him: "I mean, what happened, not what was formed, you see" (B44, Appendix). Raul then continued on:

B45        Raul    = What? {These react<sup>[1]</sup> (.)  
                      forming these<sup>2</sup>}

P-Gestures: <sup>[1]</sup>Puts his hand over the entities in the *during-reaction* frame, and then <sup>[2]</sup> over the entities in the *after-reaction* frame (2<sup>nd</sup> version of the particle-level drawing).



B46    Iris    Ok, I know that, but how does it happen? How do they form (...), and so on?



Once again, Raul's response did not meet Iris' expectations and she pressed Raul for a more in-depth account. Responding to Iris' dissatisfaction, Raul said: "Ah! How? How?," and he continued: "because they are constantly moving" (B47, Appendix). This answer still did not satisfy Iris, even though she agreed with him that these entities were moving. Unclear, however, was how motion actually relates to how new entities form. Hence, she asked Raul if the new entities formed because of collisions (B48, Appendix). Raul eventually ended up proposing something that seemed to satisfy Iris:

B49 Raul: *Because, when they collide they separate<sup>2</sup>((gestures separate, by and then they organize like this<sup>3</sup>((points to the after-reaction frame))  
<sup>1</sup>((puts his hand over the entities represented in the during-reaction frame)) pulling away his finger)) in new substances.*

Raul enacted a chain of actions with gestures on the drawing, with which he conveyed the idea that entities collide, separate, and then re-organize differently. Thus, their discussion drew to an end with Iris concluding about which substances were originated and Raul restating the entire account:

B50 Iris: *Hum, Okay... And it's like this that they<sup>1</sup>((gestures over the during-reaction frame)) form the water<sup>2</sup>((points to "H-O-H")), the gas<sup>3</sup>((("O-C-O")) and the two salts<sup>4</sup>((("Ca-Cl" and "Mg-Cl"))).*



B51 Raul: The hydrochloric acid reacts with the magnesium and calcium carbonate originating water, carbon dioxide and calcium and magnesium chlorine. As particles are in constant movement, they collide, separate and group in new substances.

B52 Iris: Ok, and that is how.

#### 4.6.1 | Elements of mechanistic reasoning

It was remarkable, in this last episode, Iris epistemic efforts for a more complete meaningful account and how Raul was willing to address Iris prompts. As Iris pressed, he came to integrate all the pieces of the mechanism that had been proposed throughout the episodes: "molecules" (key entities) in constant motion (key property of the entities) collide (key factor). When they collide (causal factor), their elementary parts disconnect from each other, and reconnect differently (key process), and that's what make up the new substances. This is a logic and coherent account that explain how key factors at the lower level of particles unpack and connect to form aggregated effects at the observable level of the substances. It indicates the presence of the heuristic *linking*, which "is the best indicator that students are working to build coherent accounts that fully explain the phenomenon" (Krist et al., 2019, p. 34).

Iris and Raul progress in explanation construction was an example of a mechanism constructed in pieces that ended up linked in a complex account considering their school-level knowledge. The way this process unfolded gives empirical credence to Krist et al. (2019) assumptions regarding how epistemic heuristics are used in an iterative process of proposing and testing how well an idea fit in the mechanism. It was remarkable, in this last episode, Iris epistemic efforts for linking the factors within a logic and coherent explanation that made sense for her and how Raul was willing to address Iris prompts.

## 5 | MECHANISTIC REASONING IN PRACTICE

In the current study, we sought to explore how students mechanistic reasoning emerges and is enacted by the creation and use of drawings. With this in mind, we drew on the essential epistemic heuristic framework for mechanistic reasoning (Krist et al., 2019). This framework identifies and characterizes elements of students' mechanistic reasoning as a form of practical reasoning strategies (heuristics). These authors argue that these heuristics are essential for guiding students when they engage in constructing mechanistic accounts. This study applied the framework in a fine-grained analysis of a pair of students interacting while creating drawings to explain a target phenomenon. By expanding the analysis from students' written accounts to students' talk, we were able to provide empirical evidence of how students' progress in constructing a mechanistic account and as such to support the Krist et al. (2019) position on the productiveness of the framework, corroborating some of their assumptions.

Findings showed evidence of students using essential epistemic heuristics for mechanistic reasoning extended over their interaction, in a flexible and iteratively way. We found students thinking across scalar levels, by considering that substances involved in the target phenomenon are made up of smaller parts, and that the target phenomenon arises as a result of a set of interactions among these smaller parts. Then, students considered these smaller parts as key entities in the system, identified their properties, unpacked how their properties changed, and characterized the process by which this change occurs. Ultimately, they were able to construct a coherent and logical explanation that accounts how the identified and unpacked factors are linked together to give rise to the phenomenon. This process of constructing a mechanistic account in many ways resemble the process that scientists undergo when searching for mechanisms; as described by Darden (2006) it is an "extended, piecemeal process with hypotheses undergoing iterative refinement" (p. 272).

Our results also gives credence to Krist et al. (2019) assumptions that these heuristics are a sort of internalized discourse instantiated in practice. In this case, we found students using the heuristics during their conversation and interactions around drawing creation as an iterative process of proposing and testing how well an idea fit in the mechanism. Hence, learning to construct mechanistic accounts is more than learning about a procedure; it involves learning a way of thinking about how things work as a form of internalized discourse (Krist et al., 2019). In addition, these findings are in line with existing literature reporting that students intuitively think about mechanisms (di Sessa, 1993; Grotzer, 2003; Kapon, 2017; Russ et al., 2008; van Mil et al., 2016) and that such mechanistic intuition can be used as a way to guide students' reasoning in productive directions (van Mil et al., 2016).

Notably, when students used these epistemic heuristics they drew on previous knowledge about the structure of matter and chemical reactions, including some intuitive rules they had learned at school. And, of interest, in the absence of appropriate knowledge about how things work they invented factors to fit in the mechanisms they were attempting to construct. Consistently, Krist et al. (2019) analysis of students' written accounts revealed that students identified and used noncanonical factors to construct sophisticated mechanistic accounts. These results strengthen the idea that students are able to engage in substantive mechanistic reasoning even when they are still struggling with the specific content knowledge (Kapon, 2017; Manz, 2012; Russ et al., 2008). Thus, creating conditions for students to engage with mechanistic reasoning will provide them with opportunities to productively make sense of the concepts that they are still struggling with.

In addition, informed by theories on distributed cognition we were also interested in understanding how students' mechanistic reasoning emerges and how it is enacted in collaborative process of drawing creation. Findings reveal that students' mechanistic reasoning was embedded in a complex interactional space created by the student and their thoughts (or mental models), their drawings, and their individual and collective actions performed on and with the drawings. Within this complex interactional space, drawings played a key role in paving the way for students reasoning about mechanisms and in enacting mechanistic reasoning. In particular, drawings were essential for pushing students to look for a mechanism, for enabling and supporting mechanistic reasoning-in-action, and for facilitating productive interactions between the students that ended up in the construction of a mechanistic explanation.

## 5.1 | Drawings pushed students to look for a mechanism

In this case, students were challenged to create scalar level drawings that intentionally drove them to consider the lower level of particles, a nontrivial, although productive heuristic for starting to reason about mechanisms (Krist et al., 2019). And indeed, these scalar level drawings proved to be a productive way for students to start questioning how things work that pushed them to search for something deeper, that is, to reason about a mechanism (Krist et al., 2019). Southard et al. (2017) and van Mil et al. (2013) have reported that “how questions” are productive starting points to search for mechanisms. Given its importance, van Mil et al. (2013) suggest the use of animations to encourage students to visualize what is actually going on at the level below the phenomenon, as these animations may facilitate the emergence of this type of questions. In fact, our findings suggest that challenging students to create their own scalar level drawings is a highly valuable activity that drives this type of questions, as drawing leads students to focus on aspects of the elements to draw, such as their structural and behavioral properties and even their arrangements in space (Bobek & Tversky, 2016; Kirsh, 2011). Thus what emerges from their drawings are valuable expressions of their intuitive thoughts about how things work.

## 5.2 | Drawings enabled and supported mechanistic reasoning-in-action

Traditionally, the benefits of drawing tend to line up with the idea that cognitive processes occur from the interaction of mental models with external representations. This implies that cognitive work requires constructing a mental model of an external representation and that thought precedes action (Zang, 1997). In this study, we adopted the perspective that cognition is distributed across the individual's mind, his/her interaction with others, and his/her interaction with the material environment (Hutchins, 2014; Osbeck & Nersessian, 2014; Zang, 1997). Therefore, thinking does not necessarily precede action, as acting is also thinking. Nersessian (2006) illustrated instances of model-based reasoning in professional scientific practice, showing how reasoning is distributed in the multiple interactions occurring among researchers working together with physical simulations. The author posits that any model (mental or physical) emerging from this process is both an individual and community achievement. Our findings are aligned with this perspective. We suggest that students' reasoning about mechanisms is distributed through a complex interactional space, which involves the students, their drawings and the multiple interactions occurring between them and their drawing; and in particular, we showed the role that the process of creating a drawing played in establishing this complex interactional space. Drawings were a joint creation that involved negotiation between both students and as a result they formed a shared meaningful space (Heiser et al., 2004) where entities of interest, their visual properties and spatial arrangements became perceptually available. This interactional space favored individual and collective interactions, where over and over students' reasoning was enacted.

Our findings further suggest instances where simply looking at the drawings resembled an act of reasoning. As when suddenly students stopped and looked at the drawing for a few seconds and then came up identifying a new key entity or unpacking a process for how an entity changes. Creating a drawing and interacting with it (even only by looking at it) works to distribute part of the reasoning process (Hutchins, 2006; Krueger, 2012), as drawings provide visuospatial information about the entities of interest, that other way would be visualized with internal visuospatial mental representations (Bobek & Tversky, 2016; Stieff & Raje, 2010). Indeed, the drawings weren't only the simple expression or transmission of thoughts previously developed, rather they supported part of the dynamic process of reasoning itself.

Moreover, reasoning with the drawings also takes advantage of embodied actions that involve gesturing and pointing. Our findings showed innumerable instances of students spontaneously gesturing and pointing on the drawn entities. Reasoning about mechanisms at a higher level depends on how students unpack multiple entities' behaviors and interactions in a system (Krist et al., 2019), which is a potentially heavy cognitive activity. Even



though drawings as previously mentioned help students imagine some simple processes, as they are static representations, more complex interactions between the entities might be too difficult to imagine by visual interaction alone (Bechtel & Abrahamsen, 2005). However, as our findings show, students spontaneously used gestures to add a dynamic layer to the static drawings. Gesturing over the drawings enabled them to animate static entities and model their actions. Rather than having to rely solely on internal resources to model the interacting entities, students could rely on both internal and external resources (Hutchins, 2006; Nersessian, 2006); with the external resources comprising both dynamic (embodied actions) and static (the drawings) representations. Thus, spontaneous gestures seemed to more than simply express a fully-formed line of reasoning, rather they are part of the material process of reasoning-in-action, where the drawing is a shared space that enables for collective action.

In the complex interactional space involving the students, the drawings, and the multiple interactions between them and the drawing, the students generated animated models of sequences of actions in the mechanism they were searching for. Reasoning with animated models is especially valuable to mechanistic reasoning; scientists reason about mechanisms by animated models (Bechtel & Abrahamsen, 2005; Nersessian, 2008) and also students (Bolger et al., 2012; Mathayas et al., 2019; Russ et al., 2008). Our findings additionally showed students generating and reasoning with real-time animated models that emerged from their ongoing interaction while jointly creating drawings. Based on this case, animating a model emerged as another essential epistemic heuristic for reasoning about mechanisms. According to Russ et al. (2008), animated models are structural elements of a mechanist account; we view it as an epistemic heuristic that students can use when engaging in drawing creation to explain a target phenomenon. Regarding Krist et al. (2019) framework, we suggest that the heuristic *animating a model* can be seen as one more heuristic that guides students to navigate between the essential heuristics *identifying* and *unpacking factors* and *linking*.

Research on the use of gestures to understand and explain phenomena in science education is still scarce. Nevertheless, some studies have reported that gestures can serve as valuable cognitive tools to support students' progress in mechanistic explanations construction (e.g., Bolger et al., 2012; Kang & Tversky, 2016; Mathayas et al., 2019). Bolger et al. (2012), for example, suggest that gestures are important tools for mentally animating elements in a system. Mathayas et al. (2019) reported that gesturing while talking helps negotiating multiple entities' activities that can then become a resource for further sense-making. These authors also showed that gestures allowed students to discuss scientific ideas without being overburdened by scientific terms. Our insights add to previous findings of gesturing and other forms of enactment (Langbeheim & Levy, 2018) as an important tool to support mechanistic reasoning. Furthermore, our case reveals the material role of drawing to induce and substantiate the use of gestures.

### 5.3 | Drawing facilitated productive interaction between students

A critical characteristic of drawings is that what is represented on the drawing does not need to be referred to in speech or held in memory, thereby reducing the cognitive load (Wardak, 2017). Indeed, when talk and gestures are acted on the drawing, the drawing provides a stable space that adds meaning to both talk and gestures (Heiser et al., 2004; Wardak, 2017). Our findings consistently showed both students using talk and gestures on the drawings to convey their ideas, which made their conversation highly contextual and fluent with minimal verbal resources. Combining the representational function of drawing and gestures on the drawing helped students articulate more ideas in their conversational turns. Indeed, when used together these modalities assume what would otherwise have to be put into words during the conversation (Roth & Welzel, 2001; Wardak, 2017). Thus, creating and using drawing and gestures together opened up more possibilities to infer and negotiate more ideas. It is well known that successful collaboration can guide students to achieved complex reasoning as they have opportunities to elaborate on each other ideas (Hogan et al., 1999), yet it is also known that such collaboration, if not carefully guided, can be

disjointed, thereby jeopardising its potentialities (Sfard & Kieran, 2001). Our findings suggest that drawings have such potentialities.

## 6 | IMPLICATIONS FOR PRACTICE AND RESEARCH

Frequently students' explanations are simple accounts based on a single factor (e.g., Bolger et al., 2012; Southard et al., 2017). Moreover, in chemistry, where phenomena comprise invisible and abstract entities and frequently students accounts are mere descriptions of what happened at the phenomenon-level (e.g., De Andrade et al., 2019; Papageorgiou, 2013). In addition, articulating a logical and coherent account is reported to be challenging for students (e.g., Bolger et al., 2012; Mathayas et al., 2019; Southard et al., 2017). Nevertheless, these studies suggest that simple explanations may develop into more complex accounts with careful instructional support. In the present study, we have shown that creating drawings in a collaborative environment allows for the emergence and enactment of mechanistic reasoning. Yet, our findings also suggest some aspects that should be considered when implementing drawing activities in the classroom to support mechanistic reasoning.

First, we suggest that drawing activities should be sufficiently open to allow students' creativity and imagination as they actively create their own products. Our findings suggest that these opportunities allowed students to bring about their intuitive thoughts, including inventing entities' properties and unpacking how they change. Second, drawing activities should challenge students to think across scalar levels. Comparing drawings at different scalar levels provides opportunities for reflecting upon observations and for abstracting relevant elements of the observed phenomenon and for considering it at the lower level of particles. Third, the conversational practice of taking turns creates a reasoning system that offers a broader range of alternatives than if students work alone. As so, the dimension of collaborative drawing looks a very important issue to incorporate in instructional practice. Fourth, drawing activities should comprise cycles of drawing, and students should have opportunities to discuss their drawings as these iterative processes help students achieve a sense of understanding (Kapon, 2017). In this case, revising an earlier drawing proved to be an important process of sense making. Finally, this case was conducted in a particular setting out of the classroom with minimal guidance because our purpose was to capture students' spontaneous reasoning. However, we believe that in the classroom, teachers' productive instructional interventions in critical moments are essential for students progress in constructing more complex mechanistic accounts. On the other hand, we share Krist et al. (2019) concerns of using these heuristics as scaffolds for the students, with the risk of making the task of constructing an explanation a procedure with specific steps, rather than a process of making sense of how things work.

From our knowledge, the present study tests the EEHMR framework (Krist et al., 2019) for the first time in students' discourse. Our findings endorse the productivity of the framework as an analytical tool for researchers interested in examining the process by which students' epistemic ideas develop in great detail. While this study specifically aims to characterise a way of thinking, we endorse research that connects these epistemic heuristics with disciplinary way of thinking. Particularly in chemistry, future research should address connections between mechanistic explanations and students' empirical knowledge about chemical substances and processes, as well as about composition and structure of chemical entities (Talanquer, 2018b). Regarding the research on students' drawings as a tool for learning, we highlight that drawings should be understood and analysed as forming and being enacted within the environment where they are produced (Nersessian, 2006). Indeed, in many instances students' reasoning was distributed among the students, the drawings and the gestures on the drawing. Hence, when the drawings are analysed as external representations of the students' ideas, much is left to be accounted for.

## ACKNOWLEDGMENTS

The authors are grateful to the two anonymous reviewers of this paper for their constructive comments and suggestions. We also wish to thank the thoughtful reading by Neta Shaby and Patrícia Gamboa. We thank the

students for their participation in this study. This study is supported by the Portuguese National Foundation for Science and Technology (SFRH/BD/119701/2016).

## REFERENCES

- Ainsworth, S., Prain, V., & Tytler, R. (2011). Drawing to learn in science. *Science*, 333, 1096–1097. <https://doi.org/10.1126/science.1204153>
- Akaygun, S. (2016). Is the oxygen atom static or dynamic? The effect of generating animations on students' mental models of atomic structure. *Chemistry Education Research and Practice*, 17, 88–807. <https://doi.org/10.1039/c6rp00067c>
- Barsalou, L. W. (2008). Grounded cognition. *Annual Review of Psychology*, 59, 617–645. <https://doi.org/10.1146/annurev.psych.59.103006.093639>
- Bechtel, W., & Abrahamsen, A. (2005). Explanation: a mechanist alternative. *Studies in History and Philosophy of Science Part C: Studies in History and Philosophy of Biological and Biomedical Sciences*, 36(2), 421–441. <https://doi.org/10.1016/j.shpsc.2005.03.010>
- Bobek, E., & Tversky, B. (2016). Creating visual explanations improves learning. *Cognitive Research: Principles and Implications*, 1(27), 27. <https://doi.org/10.1186/s41235-016-0031-6>
- Bolger, M. S., Kobiela, M., Weinberg, P. J., & Lehrer, R. (2012). Children's mechanistic reasoning. *Cognition and Instruction*, 30(2), 170–206. <https://doi.org/10.1080/07370008.2012.661815>
- Braaten, M., & Windschitl, M. (2011). Working toward a stronger conceptualization of scientific explanation for science education. *Science Education*, 95(4), 639–669. <https://doi.org/10.1002/sce.20449>
- Chi, M. T. H., & Wylie, R. (2014). The ICAP framework: Linking cognitive engagement to active learning outcomes. *Educational Psychologist*, 49(4), 219–243. <https://doi.org/10.1080/00461520.2014.965823>
- Cooper, M. M. (2015). Why ask why? *Journal of Chemistry Education*, 92(8), 1273–1279. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.5b00203>
- Cooper, M. M., Stieff, M., & DeSutter, D. (2017). Sketching the invisible to predict the visible: From drawing to modeling in chemistry. *Topics in Cognitive Science*, 9, 1–19. <https://doi.org/10.1111/tops.12285>
- Craver, C., & Darden, L. (2013). *In Search of Mechanisms: Discoveries across the Life Sciences*. The University of Chicago Press.
- Craver, C., & Tabery, J. (2015). Mechanisms in Science. The Stanford Encyclopedia of Philosophy. In Edward N. Zalta (Ed.), (Winter Edition). <https://plato.stanford.edu/archives/sum2019/entries/science-mechanisms/>
- Darden, L. (2002). Strategies for discovering mechanisms: Schema instantiation, modular subassembly, forward/backward chaining. *Philosophy of Science*, 69(S3), S354–S365. <https://doi.org/10.1086/341858>
- Darden, L. (2006). *Reasoning in Biological Discoveries: Essays on Mechanisms, Interfield Relations, and Anomaly Resolution*. Cambridge University Press.
- De Andrade, V., Freire, S., & Baptista, M. (2019). Constructing scientific explanations: A system of analysis for students' explanations. *Research in Science Education*, 49(3), 787–807. <http://doi.org/10.1007/s11165-017-9648-9>
- De Andrade, V., Freire, S., & Baptista, M. (2021). Constructing scientific explanations for chemical phenomena through drawings among 8th-grade students. *EURASIA Journal of Mathematics, Science and Technology Education*, 17(1), em1937. <https://doi.org/10.29333/ejmste/9614>
- Forbus, K. D., & Ainsworth, S. (2017). Editors' introduction: Sketching and cognition. *Topics in Cognitive Science*, 9(4), 864–865. <https://doi.org/10.1111/tops.12299>
- Grotzer, T. A. (2003). Learning to understand the forms of causality implicit in scientifically accepted explanations. *Studies in Science Education*, 39(1), 1–74. <https://doi.org/10.1080/03057260308560195>

- Heiser, J., Tversky, B., & Silverman, M. (2004). Sketches for and from collaboration. In J. S. Gero, B. Tversky, & T. Knight (Eds.), *Visual and spatial reasoning in design III* (pp. 69–78). Key Centre for Design Research.
- Hogan, K., Nastasi, B. K., & Pressley, M. (1999). Discourse patterns and collaborative scientific reasoning in peer and teacher-guided discussions. *Cognition and Instruction*, 17(4), 379–432. [https://doi.org/10.1207/S1532690XC1704\\_2](https://doi.org/10.1207/S1532690XC1704_2)
- Hutchins, E. (2006). The distributed cognition perspective on human interaction. In S. C. Levinson, & N. J. Enfield (Eds.), *Roots of human sociality: Culture, cognition and interaction* (pp. 375–398). Routledge.
- Hutchins, E. (2014). The cultural ecosystem of human cognition. *Philosophical Psychology*, 27(1), 34–49. <https://doi.org/10.1080/09515089.2013.830548>
- Kang, S., & Tversky, B. (2016). From hands to minds: Gestures promote understanding. *Cognitive Research: Principles and Implications*, 1(1), 37–18.
- Kapon, S. (2017). Unpacking sensemaking. *Science Education*, 101(1), 165–198. <https://doi.org/10.1002/sce.21248>
- Kirsh, D. (2011). Using sketching: To think, to recognize, to learn. In A. Kantrowitz, A. Brew, & M. Fava (Eds.), *Thinking through drawing: Practice into knowledge. Proceedings of an interdisciplinary symposium on drawing, cognition and education* (pp. 123–125). Art and Art Education, Teachers College, Columbia University.
- Krist, C., Schwarz, C. V., & Reiser, J. B. (2019). Identifying essential epistemic heuristics for guiding mechanistic reasoning in science learning. *Journal of the Learning Sciences*, 28(2), 160–205. <https://doi.org/10.1080/10508406.2018.1510404>
- Krueger, J. (2012). Seeing mind in action. *Phenomenology and the Cognitive Sciences*, 11(2), 149–173. <https://doi.org/10.1007/s11097-011-9226-y>
- Langbeheim, E., & Levy, S. T. (2018). Feeling the forces within materials: Bringing inter-molecular bonding to the fore using embodied modelling. *International Journal of Science Education*, 40(13), 1567–1586. <https://doi.org/10.1080/09500693.2018.1487092>
- Lynch, M., & Woolgar, S. (1990). *Representation in scientific practice*. MIT Press.
- Machamer, P., Darden, L., & Craver, C. (2000). Thinking about mechanisms. *Philosophy of Science*, 67(1), 1–25. <http://www.jstor.org/stable/188611>
- Manz, E. (2012). Understanding the codevelopment of modeling practice and ecological knowledge. *Science Education*, 96(6), 1071–1105. <https://doi.org/10.1002/sce.v96.6>
- Mathayas, N., Brown, D. E., Wallon, R. C., & Lindgren, R. (2019). Representational gesturing as an epistemic tool for the development of mechanistic explanatory models. *Science Education*, 103, 1047–1079. <https://doi.org/10.1002/sce.21516>
- McCain, K. (2015). Explanation and the nature of scientific knowledge. *Science & Education*, 24, 827–854. <https://doi.org/10.1007/s11191-015-9775-5>
- Nersessian, N. J. (2006). The cognitive-cultural systems of the research laboratory. *Organization Studies*, 27(1), 125–145. <https://doi.org/10.1177/0170840606061842>
- Nersessian, N. J. (2008). *Creating scientific concepts*. MIT Press.
- Nersessian, N. J. (2009). Conceptual change: Creativity, cognition, and culture. In J. Meheus, & T. Nickles (Eds.), *Models of discovery and creativity. Origins: Studies in the Sources of Scientific Creativity*, (vol 3. pp. 127–165). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-90-481-3421-2\\_8](https://doi.org/10.1007/978-90-481-3421-2_8)
- NGSS Lead States (2013). *Next generations science standards: For states, by states*. National Academies Press.
- Nickerson, J. V., Corter, J. E., Tversky, B., Rho, Y. J., Zahner, D., & Yu, L. (2013). Cognitive tools shape thought: Diagrams in design. *Cognitive Processing*, 14, 255–272. <https://doi.org/10.1007/s10339-013-0547-3>
- NRC (National Research Council). (2012). *A framework for K-12 science education: Practices, crosscutting concepts, and core ideas*. National Academies Press.
- Osbeck, L. M., & Nersessian, N. J. (2014). Situating distributed cognition. *Philosophical Psychology*, 27(1), 82–97. <https://doi.org/10.1080/09515089.2013.829384>
- Papageorgiou, G. (2013). Can simple particle models support satisfying explanations of chemical changes for young students? In G. Tsapalis, & H. Sevan (Eds.), *Concepts of matter in science education. Innovations in science education and technology* (vol 19. pp. 319–329). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-94-007-5914-5\\_15](https://doi.org/10.1007/978-94-007-5914-5_15)
- Park, J., Tang, K. S., & Chang, J. (2021). Plan-Draw-Evaluate (PDE) pattern in students' collaborative drawing: Interaction between visual and verbal modes of representation. *Science Education*, 105, 1013–1045. <https://doi.org/10.1002/sce.21668>
- Parnafes, O. (2012). Developing explanations and developing understanding: Students explain the phases of the moon using visual representations. *Cognition and Instruction*, 30(4), 359–403.
- Roth, W. M., & Welzel, M. (2001). From activity to gestures and scientific language. *Journal of Research in Science Teaching*, 38(1), 103–136. [https://doi.org/10.1002/1098-2736\(200101\)38:1<103::aid-tea6%3E3.0.co;2-g](https://doi.org/10.1002/1098-2736(200101)38:1<103::aid-tea6%3E3.0.co;2-g)
- Russ, R. S., Scherr, R. E., Hammer, D., & Mikeska, J. (2008). Recognizing mechanistic reasoning in student scientific inquiry: A framework for discourse analysis developed from philosophy of science. *Science Education*, 92(3), 499–525. <https://doi.org/10.1002/sce.20264>

- Schwarz, C. V., Reiser, B. J., Davis, E. A., Kenyon, L., Achér, A., & Fortus, D. (2009). Developing a learning progression for scientific modeling: Making scientific modeling accessible and meaningful for learners. *Journal of Research in Science Teaching*, 46(6), 632–654. <https://doi.org/10.1002/tea.20311>
- Sfard, A., & Kieran, C. (2001). Cognition as communication: Rethinking learning-by-talking through multi-faceted analysis of students' mathematical interactions. *Mind, Culture, and Activity*, 8(1), 42–76. [https://doi.org/10.1207/S15327884MCA0801\\_04](https://doi.org/10.1207/S15327884MCA0801_04)
- Southard, K. M., Espindola, M. R., Zaepfel, S. D., & Bolger, M. S. (2017). Generative mechanistic explanation building in undergraduate molecular and cellular biology. *International Journal of Science Education*, 39(13), 1795–1829. <https://doi.org/10.1080/09500693.2017.1353713>
- Stieff, M., & Raje, S. (2010). Expert algorithmic and imagistic problem solving strategies in advanced chemistry. *Spatial Cognition and Computation*, 10(1), 53–81. <https://doi.org/10.1080/13875860903453332>
- Strevens, M. (2008). *Depth: An account of scientific explanation*. Harvard University Press.
- Talanquer, V. (2018a). Exploring mechanistic reasoning in chemistry. In J. Yeo, T. W. Teo, & K-S. Tang (Eds.), *Science education research and practice in Asia-pacific and beyond* (pp. 39–52). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-981-10-5149-4>
- Talanquer, V. (2018b). Chemical rationales: Another triplet for chemical thinking. *International Journal of Science Education*, 40(15), 1874–1890. <https://doi.org/10.1080/09500693.2018.1513671>
- Tversky, B., & Suwa, M. (2009). Thinking with sketches. In A. B. Markman, & K. L. Wood (Eds.), *Tools for innovation: The science beyond the practical methods that drive new ideas* (pp. 75–84). Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780195381634.003.0004>
- Tytler, R., Prain, V., Aranda, G., Ferguson, J., & Gorur, R. (2020). Drawing to reason and learn in science. *Journal Research in Science Teaching*, 57(2), 209–231. <https://doi.org/10.1002/tea.21590>
- van Mil, M. H. W., Boerwinkel, D. J., & Waarlo, A. J. (2013). Modelling molecular mechanisms: A framework of scientific reasoning to construct molecular-level explanations for cellular behaviour. *Science & Education*, 22(1), 93–118. <https://doi.org/10.1007/s11191-011-9379-7>
- van Mil, M. H. W., Postma, P. A., Boerwinkel, D. J., Klaassen, K., & Waarlo, A. J. (2016). Molecular mechanistic reasoning: Toward bridging the gap between the molecular and cellular levels in life science education. *Science Education* 100, 517–585. <https://doi.org/10.1002/sce.21215>
- Wardak, D. (2017). Encapsulating concepts in gestures and drawings during educational design team meetings. *Mind, Culture, and Activity*, 24(1), 47–66. <https://doi.org/10.1080/10749039.2016.1169549>
- Wilensky, U., & Resnick, M. (1999). Thinking in levels: A dynamic systems approach to making sense of the world. *Journal of Science Education and Technology*, 8(1), 3–19. <https://doi.org/10.1023/A:1009421303064>
- Zhang, J. (1997). The nature of external representations in problem solving. *Cognitive Science*, 21(2), 179–217. [https://doi.org/10.1016/S0364-0213\(99\)80022-6](https://doi.org/10.1016/S0364-0213(99)80022-6)

**Referência:** Andrade, V., Freire, S., Baptista, M., & Shwartz, Y. (2022). Drawing as a Space for Social-Cognitive Interaction. *Education Sciences*, 12(45), xxx-xxx. <https://www.mdpi.com/2227-7102/12/1/45>.

**Informação journal:**

Emerging Sources Citation Index (ESCI) (Clarivate Analytics): Education & Educational Research—Journal Citation Indicator (JCI): 1.03 (2020)

Scopus: Social Sciences-Education (Q2): SJR 0.52 (2021)

### Versão dos autores

## Drawing As a Space for Social-Cognitive Interaction

Vanessa de Andrade<sup>1</sup> | Sofia Freire<sup>1</sup> | Mónica Baptista<sup>1</sup> | Yael Shwartz<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Instituto de Educação da Universidade de Lisboa, PORTUGAL

<sup>2</sup> Department of Science Teaching, Weizmann Institute of Science, Rehovot, ISRAEL

**Abstract:** Drawing is recognized as a powerful tool to learn science. Although current research has enriched our understanding of the potential of learning through drawing, scarce attention has been given to the social-cognitive interactions that occur when students jointly create drawings to understand and explain phenomena in science. This article is based on the distributed and embodied cognition theories and it adopted the notion of *we-space*, defined as a complex social-cognitive space, dynamically established and managed during the ongoing interactions of the individuals, when they manipulate and exploit a shared space. The goal of the study was to explore the role that collaborative drawing plays in shaping the social-cognitive interaction among students. We examine this by a fine-grain multimodal analysis of a pair of middle school students, who jointly attempted to understand and explain a chemical phenomenon by creating drawings and thinking with them. Our findings suggest that collaborative drawing played a key role in (i) establishing a genuine shared-action space, a *we-space*, and that within this *we-space* it had two major functions: (ii) enabling collective thinking-in-action and (iii) simplifying communication. We argue that drawing, as a joint activity, has a potential for learning, not restricted to the cognitive process related to the activity of creating external visual representations on paper; instead, the benefits of drawing lie in action in space. Creating these representations is more than a process of externalization of thought: it is part of a process of collective thinking-in-action.

**Keywords:** collaborative drawing, student-created drawing, social-cognitive interaction, distributed cognition, multimodality, science education.

---

## 1. Introduction

The importance of drawing for the scientific practice [1] and the growing recognition of drawing as a powerful tool to learn science [2–4] have recently inspired a number of studies in science education as well as in different content domains and learning-teaching environments. Drawing facilitates conceptual change and the development of more complex mental models [5–7] as it enhances students' visualization of ideas and concepts during the exploration of scientific models [8,9]. It also enables students to process ideas, move toward higher levels of thinking, understand more complex topics, and develop more complex explanations [6,10]. Importantly, when students create their own drawings, they become highly engaged with learning [2,11]. Thus, having students creating their own drawings is typically associated with a better understanding than when students learn from visual representations they have been given [3,12]. In particular, collaboratively created drawings provide opportunities for students to integrate multiple representations, exchange and clarify ideas, engage in elaborative discussion, build on each other's ideas, and establish shared representation and deeper science understandings [6,10,11,13,14]. Thus, collaborative drawings have affordances that emerge from both visual representation and the collaborative discourse around drawings' creation. In creating their drawings, students have the opportunity to discuss and to externalize their ideas in a shared material space, which facilitates following a line of thinking [10,15].

Although current studies have enriched our understanding of the potential of learning through drawing, questions remain open about the social-cognitive interaction that occurs around drawings' creation [7]. It is still unclear, for example, how drawing facilitates social-cognitive interaction between students, or how drawing shapes the products of that collaboration. In fact, studies on drawing have mainly focused on the effects of drawing on students' learning. These perspectives tend to conceptualize drawing as a tool that serves processes, such as to help students construct appropriate mental models or communicate the end product of their work [7]. While these studies consider the importance of the social dimension of the practice of drawing, with few exceptions they do not make social interaction an integral part of the analysis of the role of drawing for learning. From science education to other fields of research in education, only a scarce number of studies on learning through drawings' creation have conceptualized drawing as a situated activity, that is, an activity that derives its meaning from the environment where it is created and used, and, as such, an activity with the potential to shape the environment of its creation and use [16,17]. However, this perspective is essential to expand our understanding of the mechanisms by which drawing may drive learning, as it allows us to capture the features of the social and cognitive interactions with the drawing activity.

In this article, we take the theoretical perspective of distributed and embodied cognition. Theories of distributed cognition postulate that “cultural and cognitive processes are not merely interrelated but are co-implicated” [18] (p. 83), i.e., they are shared processes [19]. Distributed cognition assumes that all instances of cognition emerge from distributed processes and are not necessarily centralized in the mind or its representational processes [18,19]. Thus, cognitive processes cannot be treated separately from the environment in which they occur but as emergent from the interactions among individuals and the environment, including its social-cultural features [20–22]. Embracing this view implies that two (or more) individuals jointly working on a task are conceptualized as a cognitive system, and, as such, any cognitive achievements

in such system emerge from the complex interaction among them and the properties of the environment [18,23].

Embodied cognition theories focus on the roles of perception and action in cognition [24,25]. Theories on embodied cognition argue that cognitive processes cannot be divorced from the environment where they take place, and from the states of the body and the interactions between the body and the environment. Evidence supporting the embodied cognition approach has grown in recent years and generally supports the idea that perception and action influence cognition [26–29]. In particular, a variety of studies focus on gestures as embodied actions in the environment [17,28,30–32]. Gestures (hand movements) are themselves one kind of embodied expressions, which not only reflect an internal representation but also influence it, at least in part, by embodying cognition in action [28].

The perspective of embodied cognition is important within the perspective of distributed cognition, when the focus is on a system involving the interaction of individuals with each other and with the material environment around them. In these complex systems, the interaction of distributed and embodied cognition is substantial. Cognitive processes are distributed among interactions between individuals' minds, the environment, and the individuals' embodied actions in the environment [20,21,26]. By adopting the perspectives of distributed and embodied cognition, we are assuming that cognition is typically distributed in multiple ways, including embodied actions in the environment. Thus cognitive processes encompasses both internal and external processes, and uses the environment and actions on the environment as external informational structures that complement internal representations [24,25,33]. All together, these elements form an integrated cognitive unit, whose properties go beyond the simple aggregation of the cognitive properties of any of the individuals that are part of the system [20,23]. Besides the cognitive effects of distributed systems, some authors have also noted their social effects. Indeed, while socially interacting, individuals manipulate their surrounding environment creating a complex dynamic system in which each individual's actions shape each other's actions in a dynamic process of mutual-coordinated interactions. In distributed and embodied systems, social and cognitive processes interact and shape each other [34–36].

In sum, this study assumes that students involved in collaborative drawing activities form a distributed socio-cognitive system, comprising the students, the drawings that they created, and their communicative and embodied actions on the drawing. From these perspectives, the goal of the current study was to explore the role that collaborative drawing plays in shaping the social-cognitive interaction among students. For examining the social-cognitive interactions around drawing, we borrowed from Krueger [34] the concept of *we-space*, defined as a complex social-cognitive space, dynamically established and managed during the ongoing interactions of the individuals, when they manipulate and exploit their shared space. For that, this paper presents a pair of middle school students who jointly attempted to understand and explain a chemical phenomenon by creating drawings and thinking with them.

## **2. Methods**

### *2.1. Setting and Context*

The current study is a detailed case study focusing on the observation of one pair of 8th grade students, aged 14–15, Iris and Raul (pseudonyms), who jointly created drawings while they were trying to understand and explain a chemical phenomenon. Participants attended a three-day workshop about chemical change led by two authors of this study. The sessions were carefully designed to afford opportunities for student discovery through collaboration. The broad aim of the research was to investigate how pairs of students



collaborate and reason about the mechanisms underlying a chemical reaction through drawing creation. The phenomenon under explanation was the reaction of an antacid (i.e., pills of calcium and magnesium carbonate) to neutralize the stomach's acidity (hydrochloric acid).

Data were drawn from the first session of this workshop, where Iris and Raul worked together to create a drawing at the level of particles (i.e., the atoms, molecules, etc.) In this case, it concerns the chemical reaction of calcium and magnesium carbonate (the main components of the antacid pills) and hydrochloric acid (the main component contributing to the acidity of gastric juice). In creating the drawing, students were asked to imagine that they could see the smaller parts that make up matter constituent of the acid juices of the stomach and the antacid pills and to draw what they would see happening along the reaction. To assist in creating their drawings, students were provided with a schematic template with three frames, each corresponding to a stage of the reaction: before, during, and after.

The goal of providing students with a template focused on different stages of the process was to extend drawings from space to time, stimulating students to represent temporal events depicted in the moments before, during, and after [37]. This decision was consistent with the workshop's goal: to prompt students' thinking about the underlying mechanisms that give rise to the target phenomenon. As we aimed to stimulate interactions for capturing the students' way of thinking and interacting with each other and the drawing, we provided the minimum amount of information regarding the creation of the drawing. For instance, no information was provided about the structure of the chemical identities participating in the reaction. By doing this, students had to jointly decide which elements to represent in their drawings and how to visually represent them in space and through time. In this way, we may consider that the task is a rather open task. During the session, the students were assisted by the two researchers who led the workshop, who only intervened to structure the session (for instance, to introduce information needed to perform the tasks) and to make any clarifications when needed. The decision to reduce researchers' interventions to a minimum was thought to let students work in pairs so that they could engage in an easygoing conversation with minimum intervention and constraints.

## *2.2. Data Collection and Analysis*

The pair's interaction during the session was video-recorded, and the artifacts they produced were collected and digitalized. The analytical practice adopted in this study was fine-grained analysis inspired by the multimodal-grounded approach [38,39]. The multimodal system of analysis in this study was the drawing and participants' interactions with each other and with the drawing. The primary modalities analyzed in this study included talk and actions performed on the drawings, including sketching, gesture, and gaze. The first author conducted the multimodal transcription of the video-recorded. The multimodal approach used in transcription [39] integrate verbatim transcription of talk, snapshots of the video, description of every action performed on the drawings that included sketching, gesture, and gaze, and when applied, an interpretative description of the interaction with the propose to contextualize a particular event in the interaction. Table 1 presents and describes the primary modes of interaction that emerged from the analysis of the interaction, as well as the transcription conventions used to illustrate these modes of interaction, based on Wardak [18].

**Table 1.** Description of the modes analyzed, codes for gestures, and transcription conventions used.

| Mode     | Description                                                                                                                                                                                                                                              | Transcription Conventions |                                                                                          |
|----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| Talk     | Students' utterances in the interaction.                                                                                                                                                                                                                 | [                         | A point where the two participants start talking simultaneously.                         |
|          |                                                                                                                                                                                                                                                          | =                         | A latched utterances, with no perceptible gap.                                           |
|          |                                                                                                                                                                                                                                                          | (.)                       | Short pause.                                                                             |
|          |                                                                                                                                                                                                                                                          | (2)                       | Pause in seconds.                                                                        |
|          |                                                                                                                                                                                                                                                          | ...                       | A utterance trailing off.                                                                |
|          |                                                                                                                                                                                                                                                          | :                         | Lengthened syllables.                                                                    |
| Drawing  | Students sketch or make any kind of marks on the drawing, such as adding or deleting an element or highlighting some particular aspect or feature.                                                                                                       | (...)                     | Some material of the original transcript that has been omitted as it is not perceptible. |
|          |                                                                                                                                                                                                                                                          | @ <u>text</u> @           | Participant drawing.                                                                     |
| Gaze     | Students looked at the drawing for a moment.                                                                                                                                                                                                             | # <u>text</u> #           | Participant adding a mark or an inscription to the drawing.                              |
|          |                                                                                                                                                                                                                                                          | ^ <u>text</u> ^           | Participant looking at the drawing.                                                      |
| Gestures | Students moved their hands to point to any element or part of the drawing and/or to interact with the drawings in some way, such as to animate an element of the drawing, to depict some property of an element, or to simulate some action or behavior. | { <u>text</u> }           | Participant gesturing on the drawing.                                                    |
|          |                                                                                                                                                                                                                                                          | *text*                    | Other non-verbal actions (e.g., reading the information in the pills' box).              |

The multimodal analysis and transcription followed an iterative process. First, to complete the transcription, the video records were re-watched, and any observed action performed on and with the drawing was highlighted in the transcription using the set of conventions displayed above. Second, a description of the actions performed on the drawing was added in a separate column. Third, a preliminary narrative was constructed around the theme of drawing and the social-cognitive interactions. In this phase, particular attention was given to how students interacted with the drawings and how these interactions drove and shaped their social and cognitive processes. In this process, critical incidents indicative of the role and function of drawing in

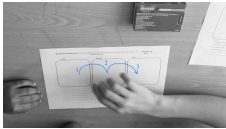
shaping the social-cognitive interaction among students were further examined. In the following section, we present our findings and discussion.

### 3. Findings and Discussion

Through a fine-grained multimodal analysis of students' creating and using a drawing to understand and explain a chemical phenomenon, we identified three key themes related to the ways in which drawing works as a space for social and cognitive work: (i) establishing a *we-space*; (ii) enabling collective thinking-in-action, and (iii) simplifying communication.

#### 3.1. Establishing a We-Space

The strip of interaction that follows occurred when Iris and Raul started to explore how the chemical reaction under explanation occurred and to consider how to represent what was happening at the level of particles:

| Line | Talk                                                                                                                                                                                                                                                     | Actions Performed on Drawing                                                                                                                                                                            | Snapshot of the Video                                                                | Description of the Visual Frame                                                                                                                                 |
|------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1    |                                                                                                                                                                                                                                                          | Gaze: Iris and Raul look at the empty drawing-sheet.                                                                                                                                                    |   | Raul and Iris are sitting side by side with the drawing-sheet in front of them.                                                                                 |
| 2    | <b>Raul:</b> Well, { <u>we have to draw a molecule</u> <sup>[1]</sup> <u>and then another molecule coming and hitting</u> <sup>[2]</sup> <u>and doing new things</u> <sup>[3]</sup> } (4) And now::: (2)<br>[What are they? <sup>[4]</sup> I don't know. | Gestures: <sup>[1]</sup> Points towards the <i>before-reaction</i> frame; <sup>[2]</sup> points towards the <i>during-reaction</i> frame; <sup>[3]</sup> and points to the <i>after-reaction</i> frame. |  | Raul and Iris are sitting side by side with the drawing-sheet in front of them Raul gestures over the drawing-sheet and Iris listen and follows Raul's actions. |
| 3    | <b>Iris:</b> [The hydrochloric acid, I know what it is (.).                                                                                                                                                                                              |                                                                                                                                                                                                         |                                                                                      |                                                                                                                                                                 |

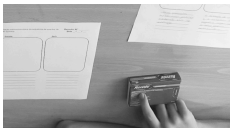
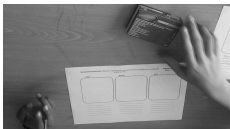
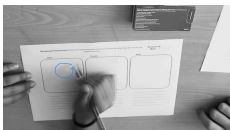
Iris and Raul were in front of the drawing-sheet, where they were supposed to draw the three stages of the chemical change (before-during-after) (see snapshot in line 1), when Raul initiated the conversation by describing what would be happening in each temporal frame [line 2]. He expressed himself using words synchronized with explicit pointing gestures towards each temporal frame on the drawing-sheet. While his words conveyed the entities and the action in which entities engaged, his gestures conveyed the temporal sequence of these actions. Together, Raul's words and embodied actions on the drawing-sheet worked to enact a representation of how the chemical reaction under explanation occurs. Being enacted in words and embodied action in the drawing, Raul's representation formed part of the material space that he and Iris shared, and it became perceptually accessible, enabling a direct experience for both. Indeed, Iris was able to derive meaning from Raul's enacted representation on the drawing-sheet, as her following action showed. Her

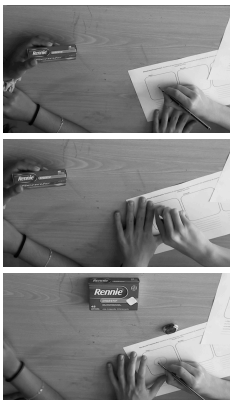
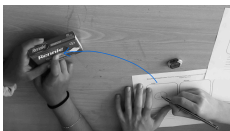
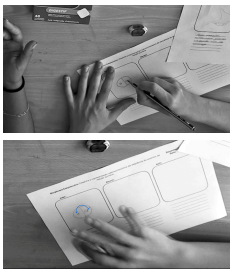
response overlapped with Raul's concluding words. When he queried about the identity of the "molecules" participating in the reaction ("What are they? I don't know."), Iris answered that she knew the composition of one of these "molecules" ("The hydrochloric acid I know what it is") [line 3]. In her immediate reaction to Raul, Iris signaled her understanding of Raul's idea, as well as her intention to follow Raul's thinking.

Hence, even before students had started to draw things on the paper, the drawing (or the drawing-sheet) had already become part of the material environment that both students shared; it played an important role in establishing their *we-space*—a social space of joint attention and mutually-coordinated interactions—as it functioned as a stable material medium for interaction that students manipulated to create a representation and to convey it in a perceptible way. The direct experience (by listening, seeing, and pointing) along with the enacted representation conveyed extensive information about each individual representation [24], essential to facilitate interpersonal understating and mutual engagement [11,40,41].

In addition, Raul's actions exploiting the drawing-sheet may have shaped the representation he created. Raul's spontaneous actions on the temporal frames of the drawing-sheet coordinated with talk may have not merely worked to convey a fully internal-formed representation; these actions may have also become part of the material process of thinking-in-action (as proposed by Krueger [42]), thus shaping the representation he created. According to models on distributed and embodied cognition, interacting with the material environment shapes one's cognitive activity, and, likely, any representation emerging from this process will have features of the environment in which it was created [21,24,27].

Following this initial intervention, the two students began to be concerned about the entities participating in the reaction ("molecules") and how to represent them visually in the drawing. The next piece of interaction illustrates this negotiation.

| Line | Talk                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | Actions Performed on Drawing                                                                                                         | Snapshot of the Video                                                                | Description of the Visual Frame                                                                                                                  |
|------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 3    | <b>Iris:</b> [The hydrochloric acid, I know what it is (.)]                                                                                                                                                                                                                                             |                                                                                                                                      |                                                                                      |                                                                                                                                                  |
| 4    | <b>Raul:</b> Okay. First: What is this?<br>*it's calcium carbonate* (5)<br>How do we draw this?<br>Carbonate: C, Calcium: Cl? (4)                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                      |    | Raul Picks-up the antacid pills' packaging and starts reading the name of components in it, i.e., the calcium carbonate and magnesium carbonate. |
| 5    | <b>Iris:</b> But, I don't remember the color of the little balls!?                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                      |                                                                                      |                                                                                                                                                  |
| 6    | <b>Raul:</b> The little balls?! The little balls?! (.) But, it doesn't matter=                                                                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                      |                                                                                      |                                                                                                                                                  |
| 7    | <b>Iris:</b> = No::: the<br>[ {representation: the drawing::} ]<br>[ <sup>[1]</sup> like imagine the oxygen, {the oxygen is...} ] <sup>[2]</sup> .                                                                                                                                                      | Gesture: <sup>[1]</sup> Taps the drawing-sheet in before-reaction frame with the pencil.<br><sup>[2]</sup> Repeats the same gesture. |  |                                                                                                                                                  |
| 8    | <b>Raul:</b> [The little balls?<br>You draw a little ball with another one next to it and you put the two together, and that's a molecule. Calcium carbonate...<br>*How do we draw calcium carbonate?* <sup>[1]</sup> (5) It's C, that's the carbon [and Cl, that's the calcium. C and Cl or [Cl and C. |                                                                                                                                      |  | Raul picks up the antacid pills' packaging and puts it down again.                                                                               |
| 9    | <b>Iris:</b><br>[It's carbonate.<br>[and calcium is Ca,<br>isn't it?                                                                                                                                                                                                                                    |                                                                                                                                      |                                                                                      |                                                                                                                                                  |
| 10   | <b>Raul:</b> Okay, it's C with Ca (...)<br>Okay, we draw=                                                                                                                                                                                                                                               |                                                                                                                                      |                                                                                      |                                                                                                                                                  |
| 11   | <b>Iris:</b> =Well, but inside what is it?<br>{Like a circle with (1)} <sup>[1]</sup>                                                                                                                                                                                                                   | Gestures: <sup>[1]</sup> Gestures a circle over the surface of the paper. with the pencil.                                           |  |                                                                                                                                                  |

|    |                                                                                                                                |                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                                                                                          |
|----|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 12 | <b>Raul:</b> We draw the C, with the Ca next to C=                                                                             |                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                                                                                          |
| 13 | <b>Iris:</b> =Calcium carbonate, is that how it is?                                                                            |                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                                                                                          |
| 14 | <b>Raul:</b> @ (5) Ok. It might be like this @ <sup>[1]</sup> (.) @_ It must be bigger (8) @ <sup>[2]</sup> .                  | Drawing: <sup>[1]</sup> Takes the pencil from Iris and draws a circle divided in two parts, and then <sup>[2]</sup> deletes it and draws a new one, but bigger; starts to inscribe Ca in one of the parts. |  <p>Raul starts to draw a circle, but then decides that it is too small, so he deletes it and draws a bigger one.</p>                                                  |
| 15 | <b>Iris:</b> But not {here. There is none of this, yet. But only H-Cl.}                                                        | Gesture: Points towards the drawing and then to the antacid pills' box.                                                                                                                                    |  <p>Iris showing Raul that in the frame before-reaction the entities of the antacid pills were not to be drawn yet, because in the beginning it is only the acid.</p> |
| 16 | <b>Raul:</b> @ H: Cl: [nothing more @                                                                                          | Drawing: Picks the rubber and deletes the entity "C-Ca" he have drawn in A13.                                                                                                                              |  <p>As Raul deletes the entity "C-Ca" Iris continues explaining to Raul why it should only be the acid in the frame before-reaction.</p>                             |
| 17 | <b>Iris:</b> [Yes, because, truly, the tablet were not there before.                                                           |                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                                                                                          |
| 18 | <b>Raul:</b> @_ Okay. So it's H:: with Cl:: @ <sup>[1]</sup> . Okay:: it's {here. [Here it's the H and the Cl]} <sup>[2]</sup> | Drawing: <sup>[1]</sup> Draws the entity "H-Cl". Gesture: <sup>[2]</sup> Points towards the "H" and then the "Cl".                                                                                         |                                                                                                                                                                      |

From the above excerpt, it soon became apparent that each student had different representations of the entity “molecule”. Raul’s intended representation was a symbolic representation (an entity represented by its chemical symbol), while Iris’s intended representation was a pictorial representation (circles with different colors that stands up for each chemical entity). As these entities are key agents in the mechanism they were attempting to explain, establishing a representational visual convention meaningful for both is an essential step.

Nevertheless, the initial exchanges [lines 3-7] show signs of personal disengagement from the interaction. Raul acts as he was having a conversation with himself, and in line 4, he seems to ignore Iris’s intervention. Actually, Raul’s reaction was a response to his own queries and an elaboration of his own ideas. Further ahead, in line 6, Raul reacted with disapproval to Iris’s wonderings about the color for representing the entities of the acid molecule [line 5]. Importantly, if these signs of social disengagement had not had been repaired, they could have ended up compromising the genuine mutual-cooperation necessary for establishing and sustaining a *we-space*. However, Iris, apparently perceiving Raul’s disengagement and willing to make her own intentions understood, reacted by elaborating her viewpoint. In line 7, she tapped in the first frame of the drawing-sheet, while saying: “the representation: the drawing”, and as she continued: “like imagine the oxygen, the oxygen is...”, she repeated her gesture as she wanted to signal something meaningful to her. Iris’s words coordinated with embodied actions on the drawing-sheet worked to reveal relevant important information about her current cognitive status (her concerns about how to actually draw a visual representation of the target entities). These actions may have also shaped Raul’s following move, as after Iris’s intervention he tried to meet her concerns by providing an eloquent oral description for the spatial arrangement of “the little balls” (suggested by Iris) in order to visually represent a “molecule” [line 8]. Indeed, Raul’s move showed signs of cooperation and attention to create an interpersonal understanding of the situation. Thus Iris’s gestures on the drawing-sheet seemed to work as a perceptual stimulus for monopolizing joint attention in managing the *we-space*.

However, Raul’s verbal description did not seem clear enough for Iris, as she remained somewhat confused about what to draw (“Well, but what is inside?”) [line 11]. So, she said “Like a circle” while gesturing a circle over the drawings-sheet, and afterwards, she pointed to the inside of “it” while saying: “with”—her gestural drawing on the drawing-sheet called Raul’s attention to the salient features of her intended representation. He responded by providing further information about how to display the elements in the drawing (“We draw the C, with the Ca next to C”) [line 12], although Iris remained somewhat uncertain [line 13]. Raul then decided to pick-up the pencil and draw a possible representation of the target entity. He said: “Ok. It might be like this” as he drew two circles together and inscribed in each one the correspondent chemical symbol [line 14]. In doing so, he transformed an individual/intended representation into a material representation that depicted relevant visuo-spatial features and that became permanently available in the *we-space*, thus allowing for intersubjective inspection [42]. Readily, Iris pointed to the drawn entity to make her evaluation. Although she agreed with what Raul drew, she noticed that before the reaction, the entities of the antacid pills “were not there [in the stomach]” “but only the H-Cl [(the acid) is in the stomach]” [lines 15–17]. This seemed to have made sense to Raul, as he readily changed the representation, accordingly [line 18].

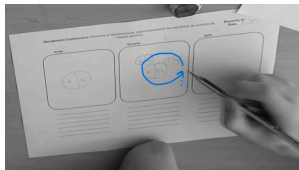
In this case, until Raul drew the entity under discussion, the two students seemed to experience difficulty in making sense of each other’s individual/intended representations. In the absence of a material visual representation, they

lacked a visual perception of each other's intended representations. Hence, they had to infer each other's representations, which indeed did not occur without misunderstanding. With the representation of the entity under discussion materialized on the paper, evaluating and negotiating its features became a much easier task, facilitating achieving interpersonal understanding about what to draw and how to draw.

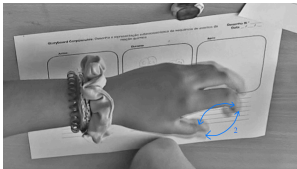
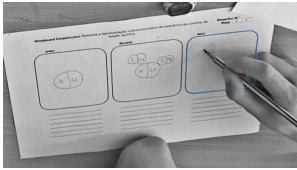
In brief, the drawing (or the drawings-sheet) worked as a material medium in the space shared by both students that they used to enact their actions and that worked to establish a space of joint attention and mutual-coordination, a *we-space*. Raul outlined a representation that laid the ground for their subsequent activity by performing a sequence of embodied actions on the drawing. When signs of disagreement came about, compromising the *we-space*, Iris made use of gestures on the drawing-sheet that functioned to manage and keep the joint attention necessary for sustaining the *we-space*. Finally, the two students ended up establishing a conventionalization to represent the key entities participating in the reaction under explanation. The representation that emerged included aspects of their individuals' representations aligned and transformed into a new representation that was the product of their joint attention and mutual coordination, dynamically established in their ongoing interactions around the drawing.

### 3.2. Enabling Collective Thinking-in-Action within the We-Space

The strip of interaction in the following excerpt occurred when the two students were dedicated to draw the during-reaction stage. They had already drawn the entities of the substances they identified during-reaction stage (i.e., the two components of the antacid pills ("C-Ca"; "C-Mg") and the acid (H-Cl)). As they finished, Raul started gesturing over the drawn entities to show them colliding while saying "they collide" [line 29].

| Line | Talk                                                                                                                | Actions Performed on Drawing                                                                                                                                                                                                                                                                      | Snapshot of the Video                                                                 |
|------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 29   | <b>Raul:</b> So, @ It's the C with magnesium, (3) Mg @ <sup>[1]</sup> {They collide with each other} <sup>[2]</sup> | <p>Drawing: <sup>[1]</sup>Draws the entity "C-Mg" in the <i>during-reaction</i> frame.</p> <p>Gesture: <sup>[2]</sup>Moves his hand, holding the pencil, over the <i>during-reaction</i> frame, making a circle that passes over the entities represented there ("C-Mg", "H-Cl", and "C-Ca").</p> |  |



|    |                                                                                                          |                                                                                                                    |                                                                                     |
|----|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| 30 | <b>Iris:</b> And { <u>this one</u> <sup>[1]</sup> <u>shrinks</u> <sup>[2]</sup> }.                       | Gesture: <sup>[1]</sup> Positioning she hand over the molecule of acid "H-Cl" in the <i>during-reaction</i> frame; |  |
|    |                                                                                                          | Gesture: <sup>[2]</sup> Gestures "shrink" by closing her hand.                                                     |  |
| 31 | <b>Raul:</b> No, I don't think they shrink (3) they originate new things. (2) @_It's water, It's H-2-O@. | Drawing: Starts drawing the entity "H-O-H" in the <i>after-reaction</i> frame.                                     |  |
| 32 | <b>Iris:</b> ^Look this is [(8) and... Ah! So, I see! ^ I see, so it also originates a salt, that is...  | Gaze: Iris looks at the drawing.                                                                                   |                                                                                     |

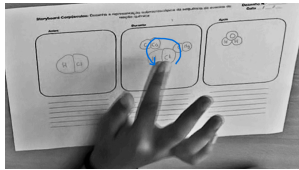
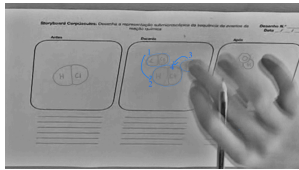
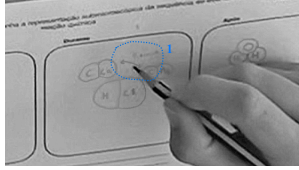
Raul's enacted collision caught Iris's attention, and she immediately reacted by gesturing over the same part of the drawing, the acid molecule shrinking [line 30], while she said: "And, this one shrinks" [line 30]. Iris's gesture was like a continuation of Raul's gestures. Thus, Iris and Raul performed an integrated sequence of gestures during this interaction, building on each other's embodied action on the drawing and generating a visual representation within the *we-space*. Raul used embodied action to convey the idea of entities colliding. Building on Raul's gestures, Iris then used a gesture for enacting the result of such collision on the acid molecules. The jointly enacted visual representation (of entities colliding and causing the acid molecules to shrink) achieved momentary visibility and significance that otherwise would have not achieved and gained particular interactional relevance. In this way, through a direct visual perception related to the representation activated by the embodied action on the drawing, an understanding of each other's ideas emerged. Indeed, it turned out that Raul became aware that the representation (acid molecule shrinking due to collisions) conflicted with the representation that he had in mind. Apparently, according to Raul's representation of the chemical reaction, molecules collide to originate new ones, i.e., new entities with a different chemical entity, which, in this case, would be the water molecules. However, Iris proposed that collisions cause a change in the molecule's material properties (i.e., size) while maintaining the same chemical identity. Aware of the emergence of different understandings, he proceeded by saying: "I don't think it shrinks. They originate new things", and then he drew a molecule of water in the after-reaction frame (represented as "H-O-H") as he stressed his idea ("It's water. It's H-2-O") [line 31]. Having this entity now available on the drawing, Iris leaned over the drawing, as though she was trying to make sense of something ("look, this is..."); and after 8 s of quietly observing the drawing, she came out to make sense of what Raul was proposing: "Ah! So, I see!" and "So, it also originates a salt" [line 32]. The entity drew by Raul was perceived at that moment in a particular way; it gained intelligibility within the activity at hand. In this way,

Iris developed a situational understanding of something that she had likely learned as a rule (an acid and an antacid react to originate salt and water).

This example shows that drawing worked as a material shared medium within the *we-space* that helped students explore each other's ideas in the process of coordinating actions and meanings. With the entities of interest drawn on a shared medium, both students gained direct access to them and were able to manipulate them through embodied actions. Instead of relying on internal representations of these entities, students worked with stable visuo-spatial representations and animated them in real-time by coordinated gestures. Raul enacted the drawn entities' actions in an integrated sequence of gestures while Iris enacted their effects. Thus, from their coordinated actions, an animated representation emerged. Importantly, this representation did not exist until it was enacted in real-time within the *we-space*. It emerged in a distributed system where each student's individual representation, drawing, and embodied actions on the drawing constitute parts of the material process of thinking-in-action [23,33]—in turn, providing an animated representation within the *we-space* allowed for further thought and collaboration, which enabled students to evaluate their individual representations and change them via thinking-in-action. What is most interesting to consider in this example is that drawing can be conceptualized as more than a visuo-spatial representation of thought on paper. Instead, creating and interacting with a drawing is part of the dynamic process of collective thinking-in-action. Drawing invites students into the interactive engagement and coordination of meanings that emerge from this interactive process; these meanings will eventually change and evolve by students coordinately acting upon the drawing with talk and gestures.

### *3.3. Simplifying Communication*

As the two students advanced in the task, their talk became more specified and conceptualized by gestures on the drawings. The strip of interaction in the following excerpt shows how students' talk was combined with highly active pointing work on the drawing that worked to simplify the flow of the conversation.

| Line | Talk                                                                                                                                                                                                                 | Actions Performed on Drawing                                                                                                                                                                                                                                      | Snapshot of the Video                                                                                                                                                          |
|------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 40   | <b>Iris:</b> I don't know, but I think it's something like {these three will combine somehow} to originate things (...) So...                                                                                        | Gesture: Gestures a circle with her finger over the entities: "C-Ca", "Mg-C" and "H-Cl" in the <i>during-reaction</i> frame.                                                                                                                                      |                                                                                             |
| 41   | <b>Raul:</b> We should focus on just one. ^ (5) <u>Ah! No::</u> ^ [1] We have to do {this one [2] with this [3] and this one [4] with this one [5]}.                                                                 | Gaze: [1] Looking at the drawing.<br>Gesture: [2] Puts his finger over the entity "C-Ca"; then [3] over the entity "H-Cl"; and then [4] he puts his finger over the entity "C-Mg;" and then [5] again over the entity "H-Cl".                                     |                                                                                             |
| 42   | <b>Iris:</b> Yeah!                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                                |
| 43   | <b>Raul:</b> There are two different combinations. (8) What is the name of the tablets? (2) Rennie, isn't it? (2) @ <u>Rennie are these two together</u> @ [1] And then, {originates water} [2] (.) and the other... | Drawing: [1] Draws an arrow connecting the entities "C-Ca" with the "C-Mg" and writes "Rennie".<br>Gesture: [2] Points with the pencil to the entity "H-O-H" drawn in the <i>after-reaction</i> frame.                                                            |                                                                                           |
| 44   | <b>Iris:</b> I think {these two together} [1] originate the calcium chloride; and {these two} [2] originate the magnesium chloride. But {all three, I don't know} [3].                                               | Gesture: [1] Puts her finger over entity "Cl" and then over the entity "Mg".<br>[2] Repeats the same gesture with the entities "Cl" and "Ca".<br>[3] Gestures a circle with her finger over the entities: "C-Ca"; "Mg-C"; "H-Cl" (the gesture is similar to A38). |                                                                                           |
| 45   | <b>Raul:</b> We (...) {this [1] and this [2], and this [3] with this [4]}...                                                                                                                                         | D-Gestures: [1] Points towards the entity "H-Cl"; and then [2] towards the "C-Ca"; and again [3] towards "H-Cl" and [4] then "C-Mg" (the gesture is similar to A39).                                                                                              | <br> |

|    |                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|----|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 46 | <b>Iris:</b> But what? The two?                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| 47 | <b>Raul:</b> It originates two. (8) It's the <sup>^(5)^</sup><br>No!?                                                                                                                                                                                                 | Gaze: Stares at the drawing.                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| 48 | <b>Iris:</b> <sup>^</sup> Does it originate one or two salts? <sup>^</sup><br><sup>[1]</sup> Will it be {this with this and this with this <sup>[2]</sup> ; or these three together? <sup>[3]</sup> }(...)                                                            | Gaze: <sup>[1]</sup> Keeps looking at the drawing;<br>Gesture: <sup>[2]</sup> Points to "Mg" and then to «Cl», and then again to "Ca" and to "Cl" (gestures similar to A42);<br><sup>[3]</sup> with her finger circles the three entities: "Cl", "Ca" and "Mg" (the gesture is similar to A38). |
| 49 | <b>Raul:</b> It is {this one with this one <sup>[1]</sup> and this one with this one <sup>[2]</sup> }. Two separated. Perhaps the two are in the same tablet, because perhaps one is stronger than the other, or it might be that they somehow complement each other. | Gesture: <sup>[1]</sup> Points towards "H-Cl" and then towards "C-Ca";<br><sup>[2]</sup> and again <sup>[2]</sup> points towards "H-Cl" and then towards "C-Mg" (the gesture is similar to A39).                                                                                                |



To an outside observer, these conversational turns look fragmented and sometimes hard to follow; this reveals that Iris and Raul have created a *w-space* that it is genuinely their own space, where they successfully function and communicate. Their talk included many deictic expressions such as “this one”, “there”, “with”, which only have meaning when considered in coordination with the gestures performed on the drawing. The entities of interest were referred to by pointing coordinated with deictic expressions, such as “this one” or “these two”—lines A41, A42, and A44 display some examples. The students avoided cumbersome scientific names by pointing to the entity of interest and by simply saying “this one” or “these two”. Without being overburdened by scientific terms, students were able to keep the conversation on task with minimum effort. Here, their pointing gestures to the entities also worked to suggest the possible rearrangements that entities undergo during the reaction. They indicated how entities, during a reaction, rearrange by a series of sequential pointing gestures on the entities of interest. For example, when saying “this one”, they pointed to one of the entities of interest. While saying “with”, they moved their finger to indicate the other [line 44]. On another occasion, they put one finger over an entity and the other finger over another while saying “these two together”.

Adding an element to the drawings was also used to highlight some aspect referred to in talk and to hold it, as in line 43, when Raul drew an arrow grouping the two entities of the antacid pill and wrote the commercial name of the antacid pills over it while saying “Rennie is these two together”. In doing so, he emphasized the idea that the antacid pills were made of two different components, and each one would react with the acid. This action not only drew attention to a relevant aspect but also made information retained in the drawing for later use.

In brief, as entities represented in drawings did not need to be referred to in speech, they also did not have to be held in memory, thus reducing the cognitive load [18]. When talk and gestures are on the drawing, drawing provides the stable medium that adds meaning to both talk and gestures [18,41]. In this case, as the drawings were a joint creation emerging from an ongoing negotiation of individual's representations, the drawn entities have a shared meaning for both students. Most frequently, we found both students using talk and gestures on the drawings for conveying their ideas. In other words, they talked to each other through embodied actions on the drawing, which made their conversation highly contextual and fluent with minimal verbal resources. Together the representational function of drawing and gestures helped students to articulate more ideas in the exchange because these modalities assume what would otherwise have to be put into words during the conversation [16,18,29]. In turn, once the continuous flow of the turn-taking was ensured, it was easier for students to introduce their ideas into the conversation, and thereby to develop higher levels of thinking [4].

#### 4. Summary and Implications

Our findings suggest that the activity of jointly creating a drawing plays a role in establishing a genuine shared-action space, a *we-space*. As a genuine shared-action space, a *we-space* is established and sustained through complex interactive processes of mutual cooperation and joint attention. It occurs when two or more individuals are mutually responsive to each other, making the necessary adjustments to achieve interpersonal understanding, resulting in the emergence of new ideas that were not previously available to the individual parts, but emerged as a shared achievement [34]. A drawing, as a visuo-spatial representation, requires making decisions about which objects to draw and how to draw it, for instance, regarding their shape, size, and location [29]. In addition, in particular, creating a drawing at the scalar level of particles requires deciding on entities and processes that cannot be seen [10]. In this case, students engaged in drawing creation with their individual representations and intentions. Thus, creating a joint drawing required them to make sense of each other's representations and intentions as well as to cooperate in developing a shared one. In addition, and more interesting, drawing itself enabled complex interactions that drove processes of mutual cooperation and joint attention. Our findings showed students exploiting the drawing space by gesturing and sketching, which served to enact their individual (private) representations and, thus, to make them perceptually available. This, in turn, worked to orient students' attention towards each other's intentions and move the interaction from the private space to the shared space. In this process, both students established a genuine shared-action space, a *we-space*, or a space of sustained focused interaction that opened possibilities for interpersonal processes of understanding [34]. These findings give strength to arguments elsewhere (e.g., [16,17,37]) that drawing cannot be reducible to a sketching activity, but it is also a social-cognitive one. Collaborative drawing may be seen as a social-cognitive space, where drawing plays a role in its establishment and management.

In this study, the *we-space* is a distributed system formed by the drawing, each student's internal representations, and their communicative and embodied actions in drawing. Within the *we-space*, the drawing's functions extended from supporting thinking to enabling collective thinking-in-action. Our findings showed students performing embodied actions on the drawing, such as gestures to simulate real-time representations. From the point of view of the theories of embodied and distributed cognition [21,25,26], these real-time representations evidence instances of collective thinking-in-action, emerging from a distributed system using representations that exist both internally and externally, which are

enacted as external representations that complement and enhance internal and individual representations [22,29,34,42]. Thus, our findings support the ongoing work on embodied and distributed cognition, suggesting that the material environment and embodied action on the material environment are critical parts of the process of thinking that cannot be treated as separated but instead as a distributed system [27,29–32]. In the case of collaborative drawing, we tentatively suggest that the thinking process is not either with or without the drawing [28], instead it is enacted through the ongoing interaction of multiple modal representations, including talk, gestures, and sketch, distributed over space, time, and participants. Indeed, a main contribution of this study was to provide empirical evidence to the theoretical ideas regarding distributed cognition and its potential to promote learning as well as that drawing has an active function in these processes.

Finally, in the joint creation of a drawing, part of the communication activity was done through the drawing by embodied actions that functioned to simplify communication in various ways. We found that as drawing took form, students' conversation was conducted through the drawing. Students' talk was frequently coupled with gestures on the drawing that functioned to make the conversation more accessible, thus helping to develop shared, coherent lines of thought and follow them smoothly. Gestures have been already recognized as an essential form of embodiment in language that facilitates communication (e.g., [31–33,43,44]). However, few studies have paid attention to the development and use of gestures in collaborative drawings (e.g., [16–18]). In this study, abstract entities and their spatial relations represented in a drawing were easily brought into the conversation by pointing gestures. Rather than having a conversation about abstract entities, the students' conversation was about concrete entities that could easily be brought into the conversation by efficient gestures on the drawing, avoiding cumbersome language and allowing for establishment and maintenance of common ground. These findings are in line with the view that gestures convey spatial information, since they help d to organize spatial information for speech and, thus, to conceptualize the information to convey [17,41,43,44].

In conclusion, the general argument that we sought to support through the present study is that drawing, as a joint activity, has potentialities for learning that are not restricted to the cognitive process related to the activity of creating external visual representations on paper; rather, the benefits of drawing lie in action in space. Creating these representations is more than a process of externalization of thought; it is part of a process of collective thinking-in-action.

One important note: in this study, the drawing activity was sufficiently open to allow students' creativity and imagination while actively creating their own products. The fact that students jointly created a drawing with minimal guidance to explain a phenomenon that deals with the unobservable level of atoms and molecules left space for interpretation of individual intentions and negotiation. These findings give strength to arguments elsewhere that it is not the drawing itself, but how drawings are used, that best supports learning [8]. While we believe that our work supports the argument to incorporate drawing activities into the science classroom, we are also aware that drawing, like many other classroom activities, is tightly related to the nature of the task in which students engage. In fact, researchers in science education claim that drawing may not always provide the expected benefits for students learning unless it is purposefully integrated into practices that challenge students to use their drawings to think [3,45]. Hence, the dimension of joint-drawing creation as a sufficiently open-ended task is a critical issue to incorporate in instructional practice.

This study did not occur without limitations. We analyzed a single case study that did not occur in a classroom setting, since our purpose was to conduct a fine-grained analysis that would allow us to describe a mechanism in great detail. The students' interaction was undoubtedly influenced by this particular social-cultural context. We believe that further research, to account for the role of drawing within other educational settings, such as the classroom, will be needed to expand our knowledge. Nevertheless, this article makes an important contribution because the framework and analysis presented here can provide the basis for such lines of research. From the many possibilities for collaborative drawing to learn, we advocated for the potential usage of drawing to understand and explain phenomena that requires dealing with lower-scalar-levels, with entities that cannot be depicted by sketching their structures and spatial relations, which can then be used to simulate their behaviors by embodied actions. Such drawing activities have the potential to turn an abstract problem into a perceptual-action experience.

This study also has implications for research by strengthening the argument for the importance of multimodal analytical approaches. We have illustrated how a multimodal analysis produced a rich description of the social and cognitive process, when students jointly created and used a drawing, and how the drawing in this environment shaped these processes. The multimodal analytical approach helped to focus on drawing and the interrelationship between the verbal and other modes of interactions concomitantly occurring. Hence, we argue that extending the current understanding of how students use drawing to learn requires an analysis of drawing within the environment of its creation and use.

**Acknowledgments:** The authors are grateful to the students who volunteer to participate in this study.

## References

1. Lynch, M.; Woolgar, S. *Representation in Scientific Practice*; MIT Press: Cambridge, MA, USA, 1990.
2. Ainsworth, S.; Prain, V.; Tytler, R. Drawing to learn in science. *Science* **2011**, *333*, 1096–1097. <https://doi.org/10.1126/science.1204153>.
3. Chi, M. T. H.; Wylie, R. The ICAP Framework: Linking Cognitive Engagement to Active Learning Outcomes. *Educ. Psychol.* **2014**, *49*, 219–243. <https://doi.org/10.1080/00461520.2014.965823>.
4. Forbus, K.D.; Ainsworth, S. Editors' Introduction: Sketching and Cognition. *Top. Cogn. Sci.* **2017**, *9*, 864–865. <https://doi.org/10.1111/tops.12299>.
5. Akaygun, S. Is the oxygen atom static or dynamic? The effect of generating animations on students' mental models of atomic structure. *Chem. Educ. Res. Pract.* **2016**, *17*, 788–807. <https://doi.org/10.1039/c6rp00067c>.
6. De Andrade, V.; Freire, S.; Baptista, M. Constructing Scientific Explanations for Chemical Phenomena through Drawings among 8th-grade Students. *EURASIA J. of Math. Sci. Tech. Educ.* **2021**, *17*, 1305–8223. <https://doi.org/10.29333/ejmste/9614>.
7. Cooper, M.M.; Stieff, M.; DeSutter, D. Sketching the invisible to predict the visible: From drawing to modelling in chemistry. *Top. Cogn. Sci.* **2017**, *9*, 902–920. <https://doi.org/10.1111/tops.12285>.
8. Brooks, M. Drawing, Visualisation and Young Children's Exploration of "Big Ideas". *Int. J. Sci. Educ.* **2009**, *31*, 319–341. <https://doi.org/10.1080/09500690802595771>.
9. Schwarz, C.V.; Reiser, B. J.; Davis, E. A.; Kenyon, L.; Achér, A.; Fortus, D. Developing a learning progression for scientific modeling: Making scientific modeling accessible and meaningful for learners. *J. Res. Sci. Teach.* **2009**, *46*, 632–654. <https://doi.org/10.1002/tea.20311>.
10. Parnafes, O. Developing Explanations and Developing Understanding: Students Explain the Phases of the Moon Using Visual Representations. *Cogn. Instr.* **2012**, *30*, 359–403.
11. Tytler, R.; Prain, V.; Aranda, G.; Ferguson, J.; Gorur, R. Drawing to reason and learn in science. *J. Res. Sci. Teach.* **2020**, *57*, 209–231. <https://doi.org/10.1002/tea.21590>.
12. Tippet, C. What recent research on diagrams suggests about learning with rather than learning from visual representations in science. *Int. J. Sci. Educ.* **2016**, *38*, 725–746. <https://doi.org/10.1080/09500693.2016.1158435>.
13. Cabello, V.M.; Moreira, P.M.; Griñó Morales, P. Elementary Students' Reasoning in Drawn Explanations Based on a Scientific Theory. *Educ. Sci.* **2021**, *11*, 581. <https://doi.org/10.3390/educsci11100581>.

14. Wilkerson-Jerde, M.H.; Gravel, B. E.; Macrander, C. A. Exploring Shifts in Middle School Learners' Modeling Activity While Generating Drawings, Animations, and Computational Simulations of Molecular Diffusion. *J. Sci. Educ. Technol.* **2015**, *24*, 396–415. <https://doi.org/10.1007/s10956-014-9497-5>.
15. Park, J.; Tang, K.-S.; Chang, J. Plan-Draw-Evaluate (PDE) pattern in students' collaborative drawing: Interaction between visual and verbal modes of representation. *Sci. Educ.* **2021**, *1*, 21668. <https://doi.org/10.1002/sce.21668>.
16. Tholander, J.; Karlgren, K.; Ramberg, R.; Sökjer, P. Where All the Interaction Is Sketching in Interaction Design as an Embodied Practice. In Proceedings of the 7th ACM Conference on Designing Interactive Systems, Cape Town, South Africa, 25 February 2008, pp. 445–454. <https://doi.org/10.1145/1394445.1394493>.
17. Wardak, D. Encapsulating Concepts in Gestures and Drawings during Educational Design Team Meetings. *Mind Cult. Act.* **2017**, *24*, 47–66. <https://doi.org/10.1080/10749039.2016.1169549>.
18. Osbeck, L.M.; Nersessian, N.J. Situating distributed cognition. *Philos. Psychol.* **2014**, *27*, 82–97. <https://doi.org/10.1080/09515089.2013.829384>.
19. Hutchins, E. The cultural ecosystem of human cognition. *Philos. Psychol.* **2014**, *27*, 34–49. <https://doi.org/10.1080/09515089.2013.830548>.
20. Hutchins, E. The distributed cognition perspective on human interaction. In *Roots of Human Sociality: Culture, Cognition and Interaction*; Enfield, N.J., Levinson, S.C., Eds.; Berg: Oxford, UK, 2006; pp. 375–398.
21. Osbeck, L.M.; Nersessian, N.J. The Distribution of Representation. *J. Theory Soc. Behav.* **2006**, *36*, 0021–8308. <https://doi.org/10.1111/j.1468-5914.2006.00301.x>.
22. Hutchins, E. How a cockpit remembers its speeds. *Cogn. Sci.* **1995**, *19*, 265–288.
23. Nersessian, N.J. The Cognitive-Cultural Systems of the Research Laboratory. *Organ. Stud.* **2006**, *27*, 125–145. <https://doi.org/10.1177/0170840606061842>.
24. Barsalou, L.W. Grounded cognition. *Annu. Rev. Psychol.* **2008**, *59*, 617–645. <https://doi.org/10.1146/annurev.psych.59.103006.093639>.
25. Wilson, M. Six views of embodied cognition. *Psychon. Bull. Rev.* **2002**, *9*, 625–636. <https://doi.org/10.3758/BF03196322>.
26. Abrahamson, D. Embodied design: Constructing means for constructing meaning. *Educ. Stud. Math.* **2009**, *70*, 27–47. <https://doi.org/10.1007/s10649-008-9137-1>.
27. Abrahamson, D.; Lindgren, R. Embodiment and Embodied Design. In *The Cambridge Handbook of the Learning Sciences: Part III—Practices that Foster Effective Learning*; Sawyer, R.K., Ed.; Cambridge University Press: Cambridge, UK, 2014; pp. 358–376. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139519526.022>.
28. Goldin-Meadow, S.; Beilock, S.L. Action's Influence on Thought: The Case of Gesture. *Perspect. Psychol. Sci.* **2010**, *5*, 664–674. <https://doi.org/10.1177/1745691610388764>.
29. Langbeheim, E.; Levy, S.T. Feeling the forces within materials: Bringing inter-molecular bonding to the fore using embodied modelling. *Int. J. Sci. Educ.* **2018**, *40*, 1567–1586. <https://doi.org/10.1080/09500693.2018.1487092>.
30. Alibali, M.W.; Nathan, M.J. Embodiment in Mathematics Teaching and Learning: Evidence From Learners' and Teachers' Gestures. *J. Learn. Sci.* **2012**, *21*, 247–286. <https://doi.org/10.1080/10508406.2011.611446>.
31. DeLiema, D.; Enyedy, N.; Steen, F.; Joshua, A.; Danish, J.A. Integrating Viewpoint and Space: How Lamination across Gesture, Body Movement, Language, and Material Resources Shapes Learning. *Cogn. Instr.* **2021**, *39*, 328–365. <https://doi.org/10.1080/07370008.2021.1928133>.
32. Mathayias, N.; Brown, D.E.; Wallon, R.C.; Lindgren, R. Representational gesturing as an epistemic tool for the development of mechanistic explanatory models. *Sci. Educ.* **2019**, *103*, 1047–1079. <https://doi.org/10.1002/sce.21516>.
33. Zhang, J. The nature of external representations in problem solving. *Cogn. Sci.* **2009**, *21*, 179–217. [https://doi.org/10.1207/s15516709cog2102\\_3](https://doi.org/10.1207/s15516709cog2102_3).
34. Krueger, J. Extended cognition and the space of social interaction. *Conscious. Cogn.* **2011**, *20*, 643–657.
35. Theiner, G.; Allen, C.; Goldstone, R.L. Recognizing group cognition. *Cogn. Syst. Res.* **2010**, *11*, 378–395. <https://doi.org/10.1016/j.cogsys.2010.07.002>.
36. Varga, S.; Krueger, J. Background emotions, proximity, and distributed emotion regulation. *Rev. Philos. Psychol.* **2013**, *4*, 271–292.
37. Tversky, B.; Suwa, M. Thinking with sketches. In *Tools for Innovation: The Science Beyond the Practical Methods that Drive New Ideas*; Markman, A.B., Wood, K.L., Eds.; Oxford University Press: New York, NY, USA, 2009; pp. 75–84.
38. Bezemer, J.; Jewitt, C. Multimodal analysis: Key issues. In *Research Methods in Linguistics*; Litosseliti, L., Ed.; Continuum Books: London, UK; New York, NY, USA, 2009; pp. 180–197.
39. Twiner, A.; Littleton, K.; Whitelock, D.; Coffin, C. Combining sociocultural discourse analysis and multimodal analysis to explore teachers' and pupils' meaning making. *Learn. Cult. Soc. Interact.* **2021**, *30*, 100520. <https://doi.org/10.1016/j.lcsi.2021.100520>.
40. Bryan-Kinns, N.; Healey, P.G.T.; Leach, J. Exploring Mutual Engagement in Creative Collaborations. In Proceedings of the 6th ACM SIGCHI Conference on Creativity & Cognition, Washington, DC, USA, 13–15 June 2007; pp. 223–232. <https://doi.org/10.1145/1254960.1254991>.
41. Heiser, J.; Tversky, B.; Silverman, M. Sketches for and from collaboration. In *Visual and Spatial Reasoning in Design III*; Gero, J.S., Tversky, B., Knight, T., Eds.; Key Centre for Design Research: Sydney, Australia, 2004; pp. 69–78.
42. Krueger, J. Seeing mind in action. *Phenomenol. Cogn. Sci.* **2012**, *11*, 149–173. <https://doi.org/10.1007/s11097-011-9226-y>.
43. Alibali, M.W. Gesture in Spatial Cognition: Expressing, Communicating, and Thinking About Spatial Information. *Spat. Cogn. Comput.* **2005**, *5*, 307–331. [https://doi.org/10.1207/s15427633scc0504\\_2](https://doi.org/10.1207/s15427633scc0504_2).



44. Kang, S.; Tversky, B. From hands to minds: Gestures promote understanding. *Cogn. Res. Princ. Implic.* **2016**, *1*, 4. <https://doi.org/10.1186/s41235-016-0004-9>.
45. Kelly, R.M.; Jones, L.L. Investigating Students' Ability to Transfer Ideas Learned from Molecular Animations of the Dissolution Process. *J. Chem. Educ.* **2008**, *85*, 303–309. <https://doi.org/10.1021/bk-2016-1235.ch007>.