

EQUIVALENTE MECÂNICO DO CALOR: ANÁLISE DE UMA EXPERIÊNCIA DIDÁTICA PARA APRENDIZAGEM SIGNIFICATIVA DA RELAÇÃO ENTRE CALOR E TRABALHO

(Mechanical equivalent of heat: analysis of a teaching experience for meaningful learning of the relationship between heat and work)

Jacson Santos Azevedo [jacsonsantosazevedo@gmail.com]

Aluno do Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física - PROFIS

Francisco Nairon Monteiro Júnior [naironjr67@gmail.com]

Programa de Pós-Graduação Profissional em Ensino de Física - PROFIS

Universidade Federal Rural de Pernambuco - UFRPE

Rua Dom Manuel de Medeiros, s/n, Dois Irmãos – CEP: 52171-900 – Recife/PE

Resumo

O equivalente mecânico do calor, sintetizado pela igualdade $1 \text{ cal} = 4,186 \text{ joules}$ apresenta oportunidades de ensino-aprendizagem quando se trata de calorimetria e termodinâmica. Tal fator de conversão possui uma riqueza histórica que cruza com a construção do princípio da conservação da energia, pela própria compreensão do conceito de energia, além das discussões a respeito da natureza do calor. Embora reconheçamos sua relevância histórica, neste artigo objetivamos apresentar os resultados de uma sequência investigativa implementada em uma escola estadual de Pernambuco, ancorada na aprendizagem significativa de Ausubel (1918-2008), assim como no ensino de ciências/física por investigação, por meio de organizadores prévios que almejavam fortalecer os seguintes subsunçores ordenados: energia, calor, temperatura, trabalho e o equivalente mecânico do calor. Os resultados apresentados pelos estudantes forneceram sinais de uma aprendizagem significativa progressiva, dentro de uma zona cinza, e de uma apropriação não arbitrária dos subsunçores supracitados.

Palavras-chave: equivalente mecânico do calor; conservação da energia; aprendizagem significativa; ensino de física por investigação.

Abstract

The mechanical equivalent of heat, synthesized by the equality $1 \text{ cal} = 4,186 \text{ joules}$ presents teaching-learning opportunities when it comes to calorimetry and thermodynamics. This conversion factor has a historical richness that intersects with the construction of the principle of energy conservation, due to the very understanding of the concept of energy, in addition to the questions regarding the nature of heat. Although we recognize its history, in this article we aim to present the results of an investigative sequence implemented in a state school in Pernambuco, anchored in the meaningful learning of Ausubel (1918-2008), as well as in the teaching of science/physics by investigation, through organizers projects that aimed to strengthen the following ordered subsumers: energy, heat, temperature, work and the mechanical mechanism of heat. The results by the school teachers provided signs of progressive explanatory learning, within a gray area, and of a non-arbitrary appropriation of the aforementioned subunits.

Keywords: electric heat equivalent; energy conservation; meaningful learning; physics teaching by research.

INTRODUÇÃO

O equivalente mecânico do calor é um importante experimento para a física que, ainda no século XIX, estava vivendo um dilema: calor é energia, na concepção da teoria dinâmica, ou um

fluido invisível e imponderável, conhecido como calórico, que migrava de um corpo, com maior temperatura, para outro, com menor temperatura? (Martins, 1984; Medeiros, 2009; Silva et al., 2013; Queirós et al., 2014; 2019). Em meio a esse debate, as contribuições trazidas por James Prescott Joule (1818-1889) colaboraram no amadurecimento da ideia atual de calor como uma forma de energia associada, estritamente, a diferença de temperatura entre os corpos envolvidos (Carmo et al., 2000; Passos, 2009; Carvalho & Gomes, 2014; 2017a; 2017b; Queirós et al., 2014; 2019).

Explorando as dificuldades experimentais do equivalente mecânico do calor, Silva et al. (2014) apresentaram um aparato com certas adaptações em relação ao experimento original de Joule. Uma dessas adaptações foi à substituição do trabalho mecânico no giro das pás, na queda das massas idênticas com energia cinética quase constante, por um motor elétrico que friccionava a água. As conclusões que os autores chegaram, sem a pretensão de validar a igualdade $1 \text{ cal} = 4,186 \text{ joules}$, foi reconstruir o experimento, explorando as dificuldades enfrentadas pelo cientista inglês na confecção do aparato, o que permitiu abrir espaço para o uso de experimentos históricos em sala de aula como uma ferramenta de ensino-aprendizagem em física. Nesse sentido Carvalho e Sasseron (2015), com uma proposta de ensino de física por investigação, relacionam os obstáculos da produção científica com a história da ciência como recurso didático que ajudam os estudantes a compreender que suas dúvidas e dificuldades se assemelham aos deparados pelos físicos da época tal como Joule em seu trabalho técnico e científico na obtenção do equivalente mecânico.

Em se tratando da história da ciência e o equivalente mecânico da caloria, Carvalho e Gomes (2017b) trazem resultados interessantes a respeito da mudança conceitual¹ de Joule e a natureza do calor. Os pesquisadores, através da análise textual discursiva (ATD), vasculham os artigos originais publicados por Joule entre 1840 e 1852 centrados na palavra-chave calor e com o uso do método dedutivo selecionam três categorias: concepção substancial do calórico, transição entre a concepção do calórico e a teoria dinâmica do calor e, por fim, concepção do calor como movimento das partículas. Investigando as fontes primárias, os autores concluem encontrar indícios de uma fase do cientista inglês na qual ele aborda calor com uma substância, o calórico, de massa desprezível e podendo ser do tipo sensível ou latente.

A transição de Joule entre a concepção substancialista e a teoria dinâmica do calor, ainda de acordo com o trabalho de Carvalho e Gomes (2017b), se inicia gradualmente a partir dos experimentos realizados por ele envolvendo, de modo geral, a substituição do motor a vapor pelo motor eletromagnético com fins no aumento do rendimento das máquinas. Essas experiências levaram Joule ao estudo do efeito térmico da corrente elétrica quando atravessava um fio metálico e, conseqüentemente, a não conservação de calórico, segundo a teoria do calor como substância (Queirós et al., 2014; 2019). Atualmente denominamos este fenômeno de efeito Joule (Maiztegui & Sabato, 1973; Tipler, 1990). Além disso, o contato de Joule com os trabalhos de Rumford (1753-1814), Faraday (1791-1867), Ampère (1775-1836) entre outros físicos, contribuíram para fortalecer o conceito de calor como movimento de partículas. Sendo assim, convencido da ideia de calor como movimento das partículas, Joule se apoia na convertibilidade da “força viva” em calor e vice-versa, ou seja, no entendimento do princípio da equivalência para aprimorar seu calorímetro de pás e determinar a equivalência entre trabalho mecânico e calor. Tal princípio resulta na concepção atual da conservação da energia.

Abordada as diferentes concepções de calor e as dificuldades experimentais pela qual Joule encontrou, o entendimento do equivalente mecânico cruzava também com a compreensão do princípio da conservação da energia segundo o qual a energia, em um sistema isolado, é constante

¹ Nesta pesquisa os trabalhos originais de Joule são analisados e constata-se uma progressiva mudança na concepção de calor enquanto fluido, na teoria do calórico, para um modelo corpuscular e vibracional de calor.

ou ainda que, a energia não pode ser criada ou destruída, mas somente transformada de uma modalidade para outra (Halliday & Resnick, 1983; Moreira, 1998). A consolidação dessa lei da natureza, construída historicamente por vários nomes da ciência, foi sendo amadurecida ao longo de quase 250 anos (Passos, 2009), contando com a contribuição de cientistas como Mayer (1814-1878), Lavoisier (1743-1794), Joule, Rumford, dentre outros. Inclusivamente os mistérios que pairam sobre o conceito de energia e seu princípio conservativo, segundo Feynman (1999), é ainda objeto de investigação e interrogações por parte da física atual, que ainda busca compreender as razões e os mecanismos de funcionamento desta lei (Moreira, 1998; Hewitt, 2002a).

O aparato que imortalizou Joule transformava trabalho mecânico em elevação da temperatura da água por atrito, isto é, em linhas gerais, a conversibilidade de energia mecânica gravitacional em energia térmica, entendida, ao longo deste artigo, como sinônima de energia interna de um corpo e distinta da modalidade de energia calor (Marques & Araujo, 2009; Jewett & Serway, 2011). Entretanto, Axt e Brückman (1989) considera impreciso o termo energia térmica e sugere sua supressão ao se trabalhar calor, temperatura e energia interna em sala de aula. Dando continuidade, o debate em torno da natureza do calor em determinado momento ocorreu paralelamente ao desenvolvimento do princípio da equivalência (Passos, 2009).

O equivalente mecânico do calor também é alvo de análises de livros didáticos. Neste âmbito, Carvalho e Gomes (2017a) trazem uma avaliação dos livros didáticos usados no ensino médio referente a essa temática. Os resultados, segundo os autores, são preocupantes porque, na maioria das amostras, o experimento é apresentado com figuras amputadas. A título de ilustração, em alguns livros aparece somente uma polia enquanto que no experimento original foram usadas duas polias, além de fortalecer uma concepção empírico-indutivista do método científico na qual tudo na ciência, suas leis e teorias, se constrói via experiência ou pela observação neutra precedente da teoria, uma ingenuidade que fica impregnada no senso comum na maneira de fazer ciência (Chalmers, 1993; Gil Perez et al., 2001; Queirós et al., 2019; Arthury, 2019; Peduzzi & Raicik, 2020).

Carmo et al. (2000) também se valeu da análise de quarenta livros textos de física, principalmente de imagens, desenhos e ilustrações do equipamento experimental de Joule, o calorímetro de pás, e do uso secundário que tais materiais didáticos reforçam em estudantes e professores, pois como salientam os autores, essas mesmas imagens comunicam ideias e auxiliam no entendimento de conceitos. Os autores reforçam que os desenhos e ilustrações de um livro texto de ciências, em particular envolvendo o equivalente mecânico do calor, devem contribuir para a reflexão e a criticidade do aprendiz, mas as investigações apontaram uma série de deformações e adulterações do aparato original de Joule. Por exemplo, alguns livros textos afirmam que os resultados encontrados por Joule no século XIX encerraram de uma vez por todas e imediatamente os debates entre os cientistas da época sobre a natureza do calor. Contudo, a história da ciência narra quase duas décadas de debates. Ainda conforme a pesquisa, as simplificações das imagens em livros do ensino médio em comparação ao aparato original construído e aprimorado por Joule incluem dispositivos com apenas uma massa, muitos sem as pás fixas, outros com um termômetro de comprimento pequeno ou sua supressão, alguns sem a manivela ou o pino de conexão e, finalmente, imagens nas quais a roldana aparece sustentada em apenas um ponto. Os autores concluem dando importância às imagens em livros textos serem coerentes de modo que tal alinhamento forneça a funcionalidade do aparato de Joule.

A respeito do trabalho técnico e experimental realizado por Joule para determinar o equivalente mecânico do calor, verifica-se o quão metódico e meticuloso ele foi, no sentido de construir o aparato adequado para a finalidade desejada concentrando-se na minimização da energia dissipada ao longo do processo. Subsidiado pela teoria atômica do calor, segundo a qual, neste

experimento, a elevação da temperatura dos corpos está associada ao aumento do movimento das partículas que constitui o corpo, Joule colocou duas massas simetricamente dispostas para equilibrar o eixo de rotação das pás com a água e, por meio do princípio da conservação da energia em uma linguagem atual, parte da energia potencial de gravidade, proveniente da queda das massas, era convertida em movimento a uma velocidade aproximadamente constante, energia cinética, e a outra parte era transformada em aquecimento, por atrito via trabalho mecânico, do volume de água no calorímetro aumentando a energia interna da água (Carvalho & Gomes, 2017a; 2017b). A minimização de perdas de energia era fundamental para aumentar a precisão das medidas. A título de exemplo, na aferição da temperatura da água, Joule utilizou um termômetro pouco massivo para desprezar sua capacidade térmica e com várias subdivisões, cuja leitura era feita com um uso de um microscópio (Carmo, Medeiros & Medeiros, 2000).

A reconstrução do experimento de Joule é alvo de grande interesse em algumas propostas didáticas, tanto no nível da educação básica como universitária. Por outro lado, a determinação do equivalente mecânico do calor nessas reconstruções é acompanhada de discrepâncias com o valor tabelado internacional e aceito pela comunidade científica correspondente a 4,186 J/cal. Sendo a reprodução do aparato original cara e dispendiosa ou, para alguns autores, irreproduzível a luz dos dados originais de Joule (Silva et al., 2014), um substituto encontrado, mais barato e acessível, é o equivalente elétrico do calor no qual, por efeito Joule, uma resistência é atravessada por uma corrente elétrica que aquece certa massa de água. De fato, conforme Alves (2008) algumas desvantagens são cruciais na reprodução do equipamento original de Joule tais como a alta sensibilidade do termômetro usado no calorímetro, o calorímetro de pás é de difícil construção, o controle rigoroso da temperatura ambiente antes e durante a realização do experimento, além de demandar um espaço considerável para montagem do aparato e, assim, dificultando a sua execução enquanto atividade experimental em sala de aula. Também podemos incrementar a esta lista, segundo Queirós et al. (2019, p. 694), desvantagens relacionadas a saberes gestuais e conhecimentos tácitos típicos dos cervejeiros do século XIX que talvez explique, a título de exemplo, a ausência em seus artigos de medições da temperatura ambiente, implicando dificuldades em sua reprodução como recurso didático ou mesmo para outros fins investigativos.

Experimentos de física térmica fazem parte da formação acadêmica básica dos estudantes dos cursos de física (Magno, 2008; USP, 2017; Campos et al., 2018; UFABC, 2019), bem como da formação inicial dos estudantes da escola média como atestam as recomendações de Arribas (1988, p. 71-84) e Axt e Brückmann (1993, p. 13-19). Por conseguinte, pela sua praticidade e baixo custo, o calorímetro elétrico é apresentado como uma alternativa interessante em comparação ao calorímetro de pás originalmente elaborado por Joule. Na Experimentoteca do Centro de Divulgação Científica e Cultural (CDCC) ligada a Universidade de São Paulo, este experimento de física é recomendado para estudantes do ensino médio quando a temática é calorimetria (USP, 2003). Outro exemplo do uso desse experimento nas salas de aulas é encontrado no Departamento de Física da Universidade do Algarve, em Portugal, na cadeira de Física II que inclui também o cálculo da eficiência de uma lâmpada imersa em água (Ualg, 2006). Já algumas universidades brasileiras estão explorando o equivalente elétrico do calor, como a Universidade Tecnológica Federal do Paraná, que apresenta um roteiro bem usual com fonte de alimentação, proveta, cabos de alimentação, calorímetro e cronômetro (UTFPR, 2018). Bolzon et al. (2006) trazem uma proposta para o equivalente mecânico do calor pelo seu análogo elétrico e com a construção de um calorímetro caseiro para estudantes de química conseguindo um resultado muito interessante por meio de um gráfico do trabalho da força elétrica em função da energia dissipada pela resistência. Alves (2008) indica construção de alguns materiais didáticos, na forma de equipamentos experimentais, como recursos instrucionais para demonstrar as transformações de diferentes modos de energia. Dentre eles, a autora sugere a construção de um calorímetro com uma resistência elétrica acoplada como

uma maneira viável e barata de mostrar a relação entre calor e trabalho elétrico, um substituto para o experimento histórico de Joule que relacionava trabalho mecânico com calor.

Dialogando com nossa proposta, Cosentino e Rios (2020) centralizam sua pesquisa nos erros sistemáticos das medidas que os experimentos em calorimetria realizados nos cursos universitários transportam. Ao discutir a determinação do calor específico de uma amostra, os autores demarcam erros de medidas associados a capacidade térmica do calorímetro, as trocas de calor com o meio externo e a temperatura de equilíbrio térmico do sistema. Em se tratando do efeito Joule produzido por uma resistência de um calorímetro elétrico, os autores indicam a adulteração da temperatura de equilíbrio pela elevação local da temperatura, nas proximidades da resistência, e, sendo assim, não refletindo a totalidade da massa de água aquecida, entretanto, sustentam as potencialidades que tal aparato oferece como recurso didático-pedagógico sem elencá-lo com o equivalente elétrico do calor. Mesmo sem a finalidade de implementação em cursos universitários cujo tratamento remete a teoria de erros das medidas, Azevedo e Monteiro Júnior (2019) também contribuem para o debate a respeito do uso instrucional do calorímetro elétrico. Contudo, a centralidade da pesquisa é nas discrepâncias entre o valor tabelado para o equivalente mecânico da caloria e os resultados obtidos pelos estudantes que, mesmo reconhecendo as limitações do aparato, tais discrepâncias foram analisadas a luz do princípio da conservação da energia, incrementos e diminuições energéticas, durante a experimentação.

Com base neste marco teórico introdutório que incluiu uma breve perspectiva histórica do equivalente mecânico do calor na ótica técnico-científica de Joule sem esquecer seu caráter de empreendimento coletivo, sua presença nas análises em livros didáticos e alguns desdobramentos desse fator de conversão para o ensino de física por meio da utilização do calorímetro elétrico, este artigo pretende, na sequência, apresentar a teoria da aprendizagem significativa (TAS) e sua vinculação com a pesquisa desenvolvida no âmbito do Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF) na UFRPE, polo 58, depois fazer uma breve exposição da metodologia ativa que orientou nossa sequência didática, sua aplicação em uma escola pública da rede estadual de Pernambuco e fornecer os resultados. Por último, trataremos das considerações finais acerca da sequência investigativa proposta para aprendizagem significativa do equivalente mecânico da caloria.

TAS: BASE TEÓRICA DE UMA SEQUÊNCIA DIDÁTICA

A teoria da aprendizagem significativa foi desenvolvida pelo estadunidense David P. Ausubel (1918-2008) a partir da década de 1960. Psicólogo de formação, Ausubel defendia duas premissas fundamentais em sua teoria construtivista, quais sejam: a intencionalidade ou predisposição do aprendiz e a confecção de materiais potencialmente significativos. Na primeira premissa o que se busca é o querer aprender do estudante, sua disposição em permitir a ancoragem do que já sabe ou detém com a nova informação. Tal ancoragem é potencializada por meio de recursos didáticos estrategicamente elaborados, quer dizer, que estejam imbricados com a segunda premissa elencada. Desenvolver materiais potencialmente significativos é tomar como mote os conhecimentos prévios do aprendiz ao integrar seus conhecimentos atuais com os novos saberes (Moreira 1999; 2012).

A primeira premissa, segundo Moreira (2005), permite ao educador identificar, por meio dos conhecimentos prévios dos estudantes, os subsunçores, termo técnico cunhado por Ausubel para classificar palavras-chaves presentes na estrutura cognitiva do aprendiz. Feita esta identificação o educador pode recorrer a outra estratégia para sedimentar os novos conhecimentos: os organizadores

prévios. Organizadores prévios são instrumentos implementados pelo educador que pretende facilitar a aprendizagem de novos saberes ou mesmo resgatar conhecimentos obliterados do educando podendo ser de duas modalidades: expositivos e comparativos. Moreira (2008) indica que a segunda modalidade é utilizada quando o aprendiz já detém certa familiaridade com o conteúdo a ser explorado e, por outro lado, os organizadores expositivos são aqueles marcados pela pouca ou até ausência de familiaridade. Sendo assim os organizadores prévios são fartamente explorados em consonância com a segunda premissa uma vez que são construídos a luz dos conhecimentos prévios e subsunçores identificados.

Mais dois conceitos balizam esta análise e são centrais: a diferenciação progressiva e a reconciliação integrativa ou integradora. O primeiro conceito é responsável por diferenciar ou discriminar os conteúdos, muito embora, simultaneamente estes mesmos conteúdos estejam relacionados, integrados ou em interdependência, de acordo com o segundo conceito (Moreira, 2013). Em outras palavras, os conteúdos devem ser arrançados de tal modo que permitam ser diferenciados e integrados pelo aprendiz. Para ilustrar o funcionamento destes dois conceitos em nossa sequência didática basta recorrer as noções de calor e temperatura. No cotidiano estas duas concepções se confundem, entretanto na física são bem delimitadas. Calor é um tipo de energia enquanto temperatura é uma medida macroscópica associada a agitação das moléculas/partículas de um corpo. Isto é, temperatura não é uma forma de energia tais como cinética ou potencial. Ademais, calor só pode ser compreendido se existir diferença de temperatura entre os corpos envolvidos e, portanto são concepções relacionadas, conforme sustenta a reconciliação integradora.

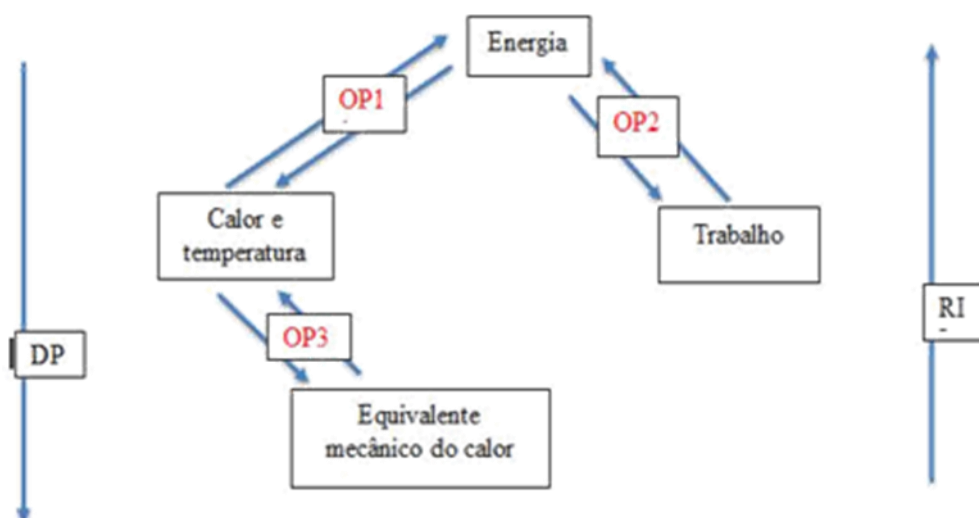
Ainda em relação a sequência didática foram elaborados três organizadores prévios a partir de cinco subsunçores, a saber: energia, calor, temperatura, trabalho e equivalente mecânico do calor. Dois dos três organizadores adotados são comparativos justamente pela pouca vivência dos educandos com atividades experimentais. Na aplicação da sequência, em um ciclo de três encontros, cada atividade experimental estava ligada a determinados subsunçores. O primeiro organizador vai tratar da relação e diferença entre energia, calor e temperatura na qual a mediação destes três subsunçores se dá por meio de um calorímetro. Já o segundo organizador prévio foi concebido para fazer a mediação entre energia e trabalho no escopo da termodinâmica. No terceiro e último organizador foi utilizado um calorímetro elétrico caracterizado por integrar e distinguir calor e temperatura do subsunçor mais específico equivalente mecânico do calor.

Na avaliação dos resultados encontrados, recorrendo a TAS, foram estudados aspectos qualitativos e quantitativos. Os primeiros aspectos foram atitudinais e comportamentais ao analisar a disposição do grupo de educandos em aprender, participar ativamente, colaborar e exercer plena intencionalidade na aquisição conhecimentos, características importantes e essenciais dentro da aprendizagem significativa e que vai em direção a tão almejada primeira premissa aqui explicitada (Moreira, 2012). Quantitativamente algumas respostas fornecidas induziam uma apropriação mecânica enquanto outras eram mais significativas, não-literais, ou bem interpretadas em um contexto distinto do usual. Contudo, mais detalhes ou pormenores serão abordados no decorrer deste artigo. Agora passemos para metodologia que pavimentou a presente pesquisa.

ENSINO POR INVESTIGAÇÃO E A TEORIA DA APRENDIZAGEM SIGNIFICATIVA INTEGRADAS EM UMA SEQUÊNCIA DIDÁTICA

Adota-se o ensino de ciências por investigação, laboratório aberto nível 1², como metodologia ativa na qual apresentamos o problema e o procedimento a ser adotado pelos estudantes (Moura, 2018). Contudo, as resoluções são abertas pois os problemas admitem explicações e argumentações científicas envolvidas por princípios e conceitos físicos essenciais, uma vez que o teor das questões por nós elaboradas estavam única e exclusivamente endereçadas para as problematizações do princípio da conservação da energia, das discussões decorrentes das discrepâncias entre o valor encontrado pelos estudantes e o tabelado, bem como das formas de energia envolvidas na cadeia energética de transformações. Portanto, os problemas relacionados à atividade experimental proposta forneciam expressões matemáticas e problematizações não usuais em comparação aos problemas de múltipla escolha, elaborados com uma única resposta certa e que geralmente conduzem para uma aprendizagem mecânica (Carvalho, 2013; Moreira, 1999; 2012). Carvalho e Sasseron (2015) aponta a emergência da utilização de um ensino de física investigativo que alavanque o desenvolvimento de uma cultura científica nos educandos. A apropriação dessa cultura por eles se dá pela dominação de diferentes linguagens utilizadas pela ciência e das quais a sequência investigativa incentiva tais como a comunicação escrita e oral dos fenômenos unido nos experimentos, além de sua operacionalização com os dados coletados.

Integrando o ensino de ciências investigativo com os pressupostos teóricos da aprendizagem significativa de Ausubel, apresentamos o mapa conceitual que orientou a sequência investigativa com os subsunçores elencados e seus respectivos organizadores prévios (Figura 1) (Moreira, 2013, p. 14). Observe o sobe e desce ou as idas e vindas que a diferenciação progressiva (DP), mais comum na aprendizagem por subordinação, e a reconciliação integradora (RI), típica das aprendizagens combinatória e superordenada, sugerem dentro da teoria da aprendizagem de Ausubel (Moreira, 1999; 2012). Outros princípios programáticos que estão implícitos no mapa conceitual abaixo são a organização sequencial, responsável pela sequência dos subsunçores ou sua hierarquização no mapa, e a consolidação dos estudantes desses subsunçores (Moreira, 1999; 2011). Note ainda que os organizadores prévios fazem a mediação entre os dois processos cognitivos, diferenciação progressiva e reconciliação integrativa, fazendo a inclusão de ideias mais gerais até a mais específica.



² Carvalho (2018) refuta o nível 1 de investigação. Para a autora, tal nível/grau de investigação não se distingue significativamente de uma aula laboratorial tradicional. Concordamos parcialmente com a perspectiva da autora, uma vez que nosso organizador prévio não foi concebido como uma atividade verificacionista, ou seja, não buscávamos a validação do fator de conversão 4,186 J/cal pelos estudantes.

Figura 1 - Mapa conceitual que regeu a sequência didática.

Para finalizar este esboço metodológico submetemos a sequência investigativa a um grupo de estudantes da Escola São Miguel pertencente a rede estadual de Pernambuco. Eram estudantes matriculados no 2º ano do ensino médio e que se encontravam em um estágio avançado de um curso de termodinâmica em 2018. O que se quer afirmar com estágio avançado da turma é a familiarização dela com aspectos teóricos da termometria, calorimetria, mudanças de fase de uma substância, transformações gasosas e a primeira lei da termodinâmica. Quanto a escolha dos estudantes para aplicação da sequência, esta foi orientada na livre iniciativa e disponibilidade dos estudantes em participar do produto educacional que, pelas limitações advindas do calendário escolar, não foi possível replicar a sequência para toda a turma.

APLICANDO A SEQUÊNCIA DIDÁTICA

A Escola São Miguel, bem como na maioria das escolas públicas brasileiras, carece de um laboratório de ciências, criando obstáculos na propagação da cultura científica e na formação de quadros vindo da educação básica com grande potencial para seguir uma carreira acadêmica. Neste contexto foi pensada e elaborada uma proposta didática, a partir de atividades experimentais investigativas, baseada na aprendizagem significativa de Ausubel e guiada pelo ensino de física por investigação que incluía, como um dos organizadores prévios, o equivalente mecânico do calor pelo seu similar elétrico usado como organizador expositivo e explorado pela sua fácil manipulação em comparação com o aparato original de Joule (Alves, 2008). Mais detalhadamente, a proposta corresponde a uma sequência didática com três atividades experimentais, classificadas como organizadores prévios (OP), quais sejam: OP1 – CAPACIDADE TÉRMICA DO CALORÍMETRO, OP2 – TRABALHO DE UM GÁS e OP3 – EQUIVALENTE MECÂNICO DO CALOR. Estes organizadores prévios tinha o objetivo de fortalecer os escassos conhecimentos prévios dos estudantes nos seguintes subsunçores hierarquizados (Moreira, 2012) já classificados, quais sejam: energia, trabalho, calor, temperatura e equivalente mecânico do calor.

Na primeira etapa da sequência didática, o subsunçor energia, mais geral e inclusivo que os demais elencados anteriormente, cujo propósito era explorar concepções prévias dos estudantes deste ente físico. Isto é, a partir da noção preexistente que os estudantes tinham de energia ou o que eles compreendiam sobre essa grandeza física em situações diárias, como, a título de exemplo, andar, pular, acender uma lâmpada ou mesmo usar o celular, explorando as modalidades de energia envolvida nestas atividades. O grupo reagiu bem, citando a presença de energia ao ligar uma lâmpada, no funcionamento de um celular ou mesmo de um ar condicionado, enquanto discutíamos as formas de energia envolvidas nestas situações. O debate em torno de energia, tida por alguns como um fluido que passa de um corpo para outro tal como na colisão de dois objetos ou mesmo quando um corpo é lançado verticalmente para cima até atingir o repouso em uma altura máxima, foi longo e com intensidade, chegando a um ponto de enunciarmos o princípio da conservação da energia e suas consequências. Dissemos que a natureza tem esse comportamento e que não sabíamos explicar a motivação disto (Feynman, 1999), em que, em um sistema mecânico isolado, por exemplo, as formas de energia envolvidas são sempre cinéticas ou potenciais de tal modo que, a soma dessas energias, antes e depois, é invariante. Ainda, de maneira mais geral sobre o princípio da conservação, foi explicado que, em um sistema conservativo, uma quantidade de energia é constante quando ocorre uma modificação de uma forma de energia para outra. O subsunçor trabalho, mais intermediário, não ganhou visibilidade nessa etapa inicial, porém, seria resgatado com mais destaque na aplicação do roteiro OP2, correspondente ao trabalho da força de um gás.

Ainda dentro do desenvolvimento da sequência, concernente a primeira etapa, poderíamos ter incrementado mais aspectos envolvendo o conceito de energia. Moreira (1998) discorre sobre a concepção de energia como, simultaneamente, abstrata, ampla e até indefinível, mas que, operacionalmente, pode ser tratada como uma grandeza física associada à capacidade de realização de trabalho ou mesmo, em conexão com a termodinâmica na sua primeira lei, segundo a qual a variação de energia interna de um sistema corresponde à diferença entre a quantidade de calor e a energia transferida pela realização de trabalho. O autor ainda traça uma argumentação, tanto a nível microscópico como macroscópica, para entropia e a irreversibilidade de processos. De fato, poderíamos ter ampliado a contribuição dessa primeira etapa ao introduzir e explicar, mesmo sem o auxílio das contas, que a entropia de um sistema nunca decresce e que, sendo assim, a disponibilidade de energia útil diminuiu, pois foi degradada. No organizador prévio OP3, quando aquecemos a massa de água no calorímetro, deveríamos ter adicionado, por exemplo, que à medida que o tempo passava a entropia do sistema água-calorímetro aumentava já que a energia interna ou térmica da água era transferida para o ambiente e, assim, decresceria a energia disponível para realização de um hipotético trabalho. Portanto, o produto educacional abre uma gama de possibilidades, inclusive de um possível organizador prévio que trate somente do subsunçor entropia.

A segunda etapa da sequência investigativa foi a execução do organizador prévio OP1 – CAPACIDADE TÉRMICA DO CALORÍMETRO, no qual os estudantes tinham que calcular a capacidade térmica do calorímetro com capacidade de 195 mL. O grande desafio desta etapa foi o transporte da água aquecida a 100 °C, via garrafa térmica, da cozinha da escola até a biblioteca pela ausência de uma fonte térmica que poderia ser uma chama de bico de Bunsen. Na sequência um debate em torno da ideia de calor e como esse conceito foi construído ao longo da história da ciência foi implementado nesta etapa. Cita-se a concepção do calórico, onde o calor era considerado um fluido invisível que migrava de um objeto de maior temperatura para um objeto de menor temperatura (Martins, 1984; Medeiros, 2009; Silva et al., 2013), mas que, submetida a novas situações, tal interpretação caiu por terra, mostrando aos estudantes que a ciência, em particular a Física, é um processo constante de elaboração, reelaboração e formulações de teorias e não uma coisa estanque e acabada.

Também discutiu-se a teoria dinâmica do calor na qual, a partir do trabalho de Rumford com usinagem de canhões, o calor era produzido pelo movimento das partículas do corpo aquecido (Silva et al., 2013). Mas, uma das limitações dessa teoria apontada pelos caloristas era explicar como o calor se propagava no vácuo pela ausência das partículas da matéria ordinária (Medeiros, 2009). Diga-se de passagem, o conceito atual de energia interna (energia térmica) de uma substância aproxima-se mais da teoria dinâmica do calor do que o próprio conceito atual e dominante de calor. Realmente, segundo Jewett e Serway (2011), o equivalente mecânico do calor se manteve com essa nomenclatura por razões históricas, mas que deveria ser rebatizado de equivalência entre energia mecânica e energia interna, indicando o uso inapropriado de calor como defendido neste artigo. Dito isto, foi definido o calor como a energia em trânsito de um corpo de maior temperatura para outro de menor temperatura (Hewitt, 2002b) que é diferente da noção de temperatura, por mais que estejam na definição de calor. O calor não pode ser armazenado em um corpo, embora este mesmo corpo tenha uma temperatura definida.

Ao descrever os modelos e concepções que precederam a definição mais moderna de calor como a teoria do calórico, do flogístico³ e a teoria dinâmica correspondente ao movimento das

³ Também conhecido por flogisto, um suposto fluido armazenado na matéria que, na combustão de um objeto, era consumido ou drenado. Nesta concepção substancialista uma folha de papel queimada e decomposta em cinzas teria seu flogístico consumido.

partículas nas substâncias (Medeiros, 2009; Silva et al., 2013) nos apropriamos da história e da filosofia da ciência como recurso instrucional e não meramente ilustrativa e biográfica, mesmo considerando que a prioridade do organizador prévio OP1 era a diferenciação progressiva dos subsunçores calor e temperatura. Nesse âmbito Medeiros e Monteiro Júnior (2001), centralizando sua proposta na reconstrução híbrida de aparatos históricos na área de acústica, fortalece a perspectiva histórica no ensino da física que estimula a criticidade dos estudantes e que torna essas reconstruções experimentais mais investigativas (Monteiro Júnior et al., 2000). Carvalho e Sasseron (2015) afirmam que ao explorar a história da física em atividades investigativas, o estudante toma conhecimento que os modelos teóricos e explicativos elaborados pelos cientistas são temporários e cheios de questionamentos.

Seguindo a sequência investigativa com o procedimento do experimento, fazendo a medição da temperatura ambiente da biblioteca por meio do aplicativo *Smart Thermometer*, registrando um valor igual a 29 °C. Uma massa de água, aproximadamente igual a 70 g, foi colocada no calorímetro e dentro de certo intervalo de tempo foi obtida uma temperatura inicial de equilíbrio térmico com o calorímetro correspondente a 27,8 °C. O aquecimento de 100 g de água até a temperatura de ebulição foi executado na cozinha da escola e transportada com o uso de uma garrafa térmica até a biblioteca e, logo em seguida, misturada com as 70 g de água inicial. Dentro de aproximadamente 5 min até a estabilização da coluna de mercúrio do termômetro analógico, o grupo encontrou a temperatura de equilíbrio térmico entre as massas de 70 g e 100 g de água e o calorímetro, obtendo um valor correspondente a 53,5 °C. A medida encontrada pelo grupo para a capacidade térmica do calorímetro ao aplicar o princípio da conservação da energia, foi de 111 cal/°C, cerca de quatro vezes maior do que o encontrado por nós. Essa diferença gritante se deu em função, quase exclusivamente, do transporte da massa de 100 g da cozinha para biblioteca, ocasionando trocas de energia significativas com a garrafa e o ar atmosférico. Ademais, podemos mencionar que, no aquecimento da água, parte da sua massa foi vaporizada e, portanto, misturamos uma massa menor que 100 g (Cosentino & Rios, 2020). Porém, é muito importante salientar que esse último detalhe não foi tão relevante na discrepância da capacidade térmica do calorímetro.

O objetivo não era validar a relação entre calor e trabalho dada por 4,186 J/cal que imortalizou a correspondência entre este fator de conversão à figura de Joule. A sequência didática priorizava as problematizações envolvendo justamente essas diferenças entre o valor encontrado pelos estudantes e o valor tabelado para o equivalente mecânico do calor explorando possíveis explicações deles a luz do princípio da conservação da energia e das limitações do aparato para os resultados divergentes. É importante ainda considerar que o produto educacional é extremamente flexível e, segundo Moreira (2017), ancorado em uma aprendizagem significativa crítica que explora diferentes estratégias de ensino, o docente pode reproduzir, de acordo com seus objetivos e necessidades, os organizadores prévios o quanto achar conveniente para fortalecer a base subsunçora dos estudantes. Sendo assim se realiza a manutenção do valor adulterado para a capacidade térmica do calorímetro que afetaria o valor que os estudantes encontrariam para o equivalente mecânico do calor com o calorímetro elétrico.

Mantida essa medida para a capacidade térmica, a segunda pergunta do questionário do organizador prévio era mais conceitual e pedia para o grupo diferenciar os conceitos calor e temperatura. Os estudantes apresentaram a mesmas noções equivocadas entre essas grandezas físicas que, por natureza, estão integradas ou articuladas, mas se diferenciam. Com fortes traços de uma aprendizagem mecânica e literal, os estudantes escreveram as definições usuais encontradas em livros textos, sem fazer as devidas reconciliações e divergências. Especulamos que, de acordo com Moreira (2012), os estudantes estavam em uma fase de transição, em uma chamada zona cinza, ou seja, um contínuo entre a aprendizagem mecânica e a aprendizagem significativa. Na segunda parte, ainda na segunda questão, os estudantes não trouxeram nenhuma contribuição mesmo se

apropriando da definição de calor, na qual se esperava que argumentassem que, existindo uma diferença de temperatura entre o calorímetro e o ar da biblioteca, um fluxo térmico dissipativo removeria energia do calorímetro para a vizinhança, modificando o valor da capacidade térmica do calorímetro, mesmo considerando esse efeito irrisório em comparação a improvisação inicial responsável pela adulteração do valor da capacidade térmica. Por mais que sejam mínimas essas perdas de energia, em uma proposta experimental investigativa, a explicação esperada com argumentos físicos demonstraria indícios de uma aprendizagem significativa.

Antes de detalhar a terceira etapa, ainda levantando algumas considerações concernentes a segunda fase do nosso produto educacional, a riqueza histórica que cerca os conceitos de temperatura e calor poderia ser mais explorada no organizador prévio OP1. A lei zero da termodinâmica que trata do equilíbrio térmico entre corpos, de acordo com Cindra e Teixeira (2004), mesmo no contexto da obtenção da capacidade térmica de um calorímetro, ampliaria a possibilidade de uma aprendizagem significativa dos subsunçores calor e temperatura. A pesquisa descreve, através de detalhes da concepção histórica e epistemológica da natureza do calor e do desenvolvimento da termometria, que um entendimento conceitual de equilíbrio térmico auxiliaria uma apropriação, por parte dos educandos, não-arbitrária de calor e temperatura. Realmente nesta etapa poderíamos ter dado mais destaque a noção de equilíbrio térmico principalmente quando os estudantes aferiam a temperatura do sistema água-calorímetro, acrescentando, como sugerem os autores, que transferir energia para um sistema em função da diferença de temperatura com sua vizinhança não implica obrigatoriamente em aumento de temperatura, como, por exemplo, na fusão do gelo ou na ebulição da água.

A respeito da terceira etapa da nossa sequência didática, o objetivo era fortalecer o subsunçor trabalho com um viés termodinâmico já que o organizador prévio selecionado, OP2 – TRABALHO DE UM GÁS, exploraria a realização de trabalho pela força de um gás ao empurrar um êmbolo de uma seringa e expandir seu volume em uma transformação quase adiabática. Inicialmente o grupo apresentou uma noção de trabalho típica do senso comum: um esforço físico ou mental. Explicamos que trabalho de uma força, em geral apresentado nos livros textos de mecânica no 1º ano do ensino médio, é uma forma de transferir energia para sistemas e, por exemplo, provocar deslocamentos em objetos por meio de forças. Essa concepção de trabalho de uma força, segundo Cachapuz et al. (2005), pode conduzir o aprendiz a corresponder trabalho de uma força a somente a decréscimo de energia de um sistema. Por isso, foi abordado o conceito associado à variação de energia de um sistema e, sendo assim, que trabalho de uma força também pode aumentar a energia de um sistema, como enuncia o teorema energia-trabalho. Também foi explicado aos estudantes, além do teorema energia-trabalho, que, para a realização de trabalho, a força deve ser aplicada paralelamente a direção do deslocamento do corpo. Ilustrados essa situação por meio das concepções alternativas lembradas de seus conhecimentos prévios no qual trabalho é um tipo de esforço físico. Quando uma pessoa carrega um objeto “pesado” apoiado em sua cabeça, por exemplo, não existe a realização de trabalho, pois a força está sendo aplicada em uma direção perpendicular ao vetor deslocamento, assumindo que a pessoa percorre um caminho horizontal. Outra exemplificação abordada nesse organizador prévio seu deu por meio da força peso do próprio calorímetro ao tomar o chão como nível de referência. Foi explicado novamente aos estudantes que existem situações de movimento de um objeto sem realização de trabalho de uma força. Ao considerar o deslocamento do calorímetro ao longo da mesa de apoio, esta última paralela ao chão referencial, o peso do calorímetro não realizava trabalho pela mesma motivação explicada anteriormente, qual seja: o peso era sempre perpendicular ao deslocamento.

Realizadas essas discussões com um caráter mais conceitual envolvendo o conceito físico de trabalho de uma força e o teorema da energia-trabalho sem aprofundamentos, digamos, com a evocação de forças internas, externas, conservativas e não conservativas, segue-se com o roteiro que

foi uma adaptação extraída do trabalho de Arribas (1988, p. 30) para mostrar a compressão de uma bolha de ar. As seringas foram distribuídas aos estudantes, com capacidade máxima de 10 mL e sem as agulhas. Logo em seguida, foi obstruída a entrada da seringa e o êmbolo foi pressionado e, assim, o volume de ar, supostamente um gás ideal, foi comprimido. Ao liberar o êmbolo, a pressão do ar no interior da seringa exerceu uma força no êmbolo, aumentando o volume do ar e realizando trabalho em um subsistema mecânico hipotético na sua vizinhança. O procedimento, muito simples de ser realizado, foi executado perfeitamente pelo grupo que assimilou muito bem o conceito físico de trabalho aplicado a um gás ideal a ponto de, por livre iniciativa, criarem, com o uso das seringas, uma situação em que o ar dentro da seringa sofria trabalho do meio externo. Para tal, a seringa era totalmente comprimida e depois obstruída sua entrada. Ao tentar avançar o êmbolo da seringa, os estudantes encontravam certa resistência a tal avanço que, ao liberarem o êmbolo, a pressão externa do ar empurrava-o para a posição original e, portanto, a força do ar externo a seringa realizava um trabalho sobre o sistema (ar aprisionado na seringa). Obviamente que se trata de uma situação simples. Contudo, aproveitamos esta iniciativa dos estudantes para fortalecer mais ainda a conceito de trabalho em transformações gasosas do tipo quase adiabáticas.

Foi explicado que na compressão do ar, o sistema aumentava sua energia, mas ao liberar o êmbolo, essa energia diminuía no sistema e crescia em sua vizinhança em um suposto subsistema mecânico como, por exemplo, um pistão. Frisamos neste momento que o trabalho da força do ar provocava variação de energia, assim como o teorema energia-trabalho discutido anteriormente e se concluiu afirmando que trabalho, como transferência de energia, poderia induzir a única concepção de diminuição de energia, mas que também incluía crescimento energético (Cachapuz et al., 2005). Além do mais, é importante destacar que esse experimento não foi acompanhado de um questionário, porque o enfoque foi mais pela conceituação de trabalho e sua relação com energia por meio do teorema energia-trabalho e também na transformação termodinâmica quase adiabática do ar na seringa em função da velocidade de realização da expansão do ar. Por fim, essa atividade tinha o objetivo de demonstrar trabalho mecânico em execução, uma vez que, que a sequência didática aborda o equivalente mecânico do calor.

Na quarta e última etapa da proposta didática, foi executado o organizador prévio mais específico: OP3 – EQUIVALENTE MECÂNICO DO CALOR. Lembramos aos estudantes que em nosso bimestre letivo anterior foi solicitado um trabalho escrito, em grupo, envolvendo este tema e como Joule construiu seu aparato que, por meio de trabalho mecânico, as pás do calorímetro atritavam a água e, portanto, aquecendo-a, elevava a sua temperatura. Em um trabalho meticuloso desenvolvido por Joule (Carmo, Medeiros & Medeiros, 2000; Passos, 2009), ao longo de 35 anos (Passos, 2009), se debateu com os estudantes que, neste experimento, o princípio da conservação da energia seria o fio condutor da parte teórica do roteiro. Logo em seguida, durante a leitura do roteiro realizada pelos estudantes, explicamos o funcionamento do multímetro no modo voltímetro e como associa-lo em paralelo com a resistência do calorímetro. A intensidade da corrente, para fins de cálculo da potência do calorímetro, vinha indicada no roteiro.

O procedimento do experimento foi realizado com facilidade pelos estudantes, mostrando um amadurecimento ao longo da sequência didática, registrando as medições, manipulando e fazendo corretamente as leituras dos instrumentos, mesmo quando o voltímetro oscilava. Neste momento, convencionamos conjuntamente com os estudantes, para fins de realização das contas, adotar 4,5 V para ddp nos terminais da resistência do calorímetro. Por conseguinte, na elaboração dos cálculos, com o uso do princípio da conservação da energia e do valor da capacidade térmica do calorímetro encontrado no organizador prévio OP1, mesmo com o uso das calculadoras dos celulares, os estudantes apresentaram algumas dificuldades nas contas.

O grupo encontrou um equivalente mecânico da caloria pelo seu análogo elétrico igual a 3,86 J/cal. Um ótimo resultado quando levado em consideração as limitações do aparato. No entanto, por outro lado, recordamos ao grupo que este valor estava adulterado porque a capacidade térmica do calorímetro também estava adulterada já que não tínhamos um laboratório de ciências bem equipado na escola. O debate em torno deste resultado, em comparação ao valor tabelado 4,186 J/cal, foi imediato e o grupo foi estimulado a refletir e argumentar a diferença com o resultado encontrado por eles. O grupo mencionou as limitações dos instrumentos de medida do aparato e as flutuações das medidas da parte elétrica do circuito e, acrescentamos, as perdas de energia ocasionadas pelo aquecimento e o transporte de 100 mL de água na obtenção da capacidade térmica do calorímetro. A Figura 2 exibiu um dos momentos da realização dessa etapa da sequência investigativa caracterizado pela resolução do questionário vinculado ao subsunçor equivalente mecânico do calor.



Figura 2 – Estudantes resolvendo o questionário proposto.

Por último, na segunda pergunta do questionário relacionada ao organizador prévio OP3, foi perguntado a respeito das modalidades de energia que permeavam esse experimento. O grupo citou a energia elétrica associada ao funcionamento do circuito elétrico e a energia térmica correspondente ao aquecimento da massa de água no calorímetro. Infelizmente o grupo não mencionou o calor. Esperava-se que o grupo, em uma situação pouco trivial envolvendo calor, argumentasse que a resistência do calorímetro, quando atravessada pela corrente elétrica, aumentava sua temperatura em relação à temperatura da água e, assim, transferia energia para a água, enquanto existisse esta diferença de temperatura, sendo esta energia térmica transferida denominada calor (Axt & Brückmann, 1989; Hewitt, 2002b; Marques & Araújo, 2009). Lembramos que existe uma diferença entre energia térmica e calor. Na conceituação adotada por nós, a energia térmica do nosso aparato correspondia ao movimento das moléculas de água e, portanto, sinônimo de energia interna (Jewett & Serway, 2011). Calor, por outro lado, é a energia térmica em trânsito ou em transferência, espontaneamente, de um corpo de maior temperatura para outro de menor temperatura (Hewitt, 2002b).

AVALIANDO OS RESULTADOS

A avaliação dos estudantes passava pela análise dos questionários, pela explicação oral dos fenômenos físicos embutidos nos organizadores prévios e as respostas a estímulos, em meio às

execuções dos experimentos, tendo como foco encontrar evidências de uma aprendizagem significativa, em uma visão ausubeliana.

Em linhas gerais, o grupo de estudantes se apropriou progressiva e significativamente dos subsunçores classificados nesta sequência didática por mais que, em alguns momentos, tenham apresentado fortes sinais de uma aprendizagem mecânica, principalmente nos subsunçores calor e temperatura, quando escreveram a definição ao pé da letra dessas grandezas físicas e não discorreram sobre suas diferenças e convergências. Moreira (2013) enfatiza que a aprendizagem significativa não é imediata e, na maioria das situações investigadas, ocorre de modo gradual, progressiva, não linear e dentro de uma zona cinza, um contínuo entre a aprendizagem significativa e a mecânica (Moreira, 2012; 2013). Isto é, o grupo em termos de aprendizagem, se situou na zona cinza ausubeliana como resultado da aplicação da sequência didática investigativa.

Outro comentário a respeito dos resultados encontrados na segunda etapa da sequência investigativa, segundo Köhnlein e Peduzzi (2002), são as concepções alternativas que os estudantes carregam quando os conceitos são calor e temperatura e, assim, a dificuldade em se desvencilhar de tais concepções. De acordo com as pesquisadoras, dentre esses conceitos equivocados, os estudantes entendem calor como um fluido que corpos aquecidos apresentam enquanto que, corpos frios, não tem essa propriedade chamada calor (Axt & Brückmann, 1989; Valadares, 2012). Os estudantes também confundem calor e temperatura, entendendo-os como sinônimo de corpos quentes. As autoras elaboraram um plano de ensino, com uma abordagem construtivista, que vai desde uma construção da história da natureza do calor, passando pela diferenciação entre calor, temperatura e energia interna de uma substância, processos de propagação de calor, dentre outros, com distintas estratégias de ensino como pesquisas, exibição de vídeos e entrevistas, ainda contando com formas de avaliação diversificadas. Os resultados da aplicação desse plano de ensino, mesmo com os estudantes da amostra trabalhada demonstrando um desenvolvimento conceitual considerável, foi que alguns estudantes ainda faziam a manutenção de conceitos equivocados de calor, temperatura e energia interna. Diante do exposto e transpondo essa pesquisa para o produto educacional, mesmo submetidos a situações novas e problematizadas, o grupo também teve dificuldades em se apropriar dos conceitos científicos de calor e temperatura repousados em concepções espontâneas das mesmas.

Além do mais, no decorrer dos experimentos o grupo mostrava clareza e iniciativa, justificando oralmente em situações com características poucas usuais, ao responder os estímulos, como, a título de exemplo, ao afirmarem que determinada massa de água tem uma temperatura maior que outra, ocasionando em suas moléculas um maior grau de agitação ou mesmo, no subsunçor energia ao identificarem sem dificuldades os tipos de energia nessa atividade experimental, mesmo deixando de fora o calor como uma das modalidades de energia, exibindo traços em direção de uma formação da cultura científica (Carvalho & Sasseron, 2015).

Outro ponto importante é a respeito do subsunçor trabalho. O grupo se integrou e compreendeu o subsunçor trabalho quando realizado a ponte com o estudo da termodinâmica no organizador prévio OP2 – TRABALHO DE UM GÁS, entendendo que a força do gás, implícita na pressão do mesmo, empurrava o êmbolo e transferia energia a um subsistema mecânico imaginário. Explicamos que trabalho é variação de energia ou, em outras palavras, enquanto o ar aprisionado na seringa diminuía sua energia, a energia aumentava na vizinhança. Portanto, trabalho de uma força também implica em crescimento energético (Cachapuz et al., 2005). Ademais, o formalismo matemático, consequência direta do princípio da conservação da energia, foi executado pelo grupo sem maiores dificuldades garantindo o valor da capacidade térmica do calorímetro e do equivalente mecânico do calor com o uso do calorímetro elétrico, assim como, demonstrando uma maior consolidação da linguagem científica, conforme Carvalho e Sasseron (2015).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A começar pela nossa decisão metodológica, esta foi pautada em atividades experimentais não verificacionistas e sua abertura para resoluções dissertativas e argumentativas sustentadas em princípios físicos e operacionalizações. As arguições, escritas ou orais, se colocam como critérios conceituais e as manipulações algébricas por meio das contas se situam na parte mais quantitativa advinda das operacionalizações embasadas em leis físicas. O nível 1 para um laboratório aberto, apesar das limitações sinalizadas por Carvalho (2018), permite situações didáticas com grau moderado de investigação quando comparada aos níveis 3 ou 4 ou ainda a modalidade investigativa problemas abertos (Azevedo, 2016), sem abrir mão da manipulação, aferição e recolhimento de dados empíricos pelos aprendizes. Quer dizer, os organizadores prévios cumpriram com seu objetivo por conter características tais como experimentação com manipulação dos aparatos pela participação direta dos estudantes, seja na medição ou obtenção dos dados, e, conforme já mencionado, pelo conteúdo das respostas apresentadas, ora literais e arbitrarias ora articuladas com explicações físicas desejáveis. Então, a luz da TAS, podemos afirmar que os organizadores atuaram como ferramentas potencialmente significativas por contribuir, em determinadas passagens, na ancoragem dos conhecimentos prévios dos estudantes e os novos saberes.

Outro comentário sobre os organizadores é a respeito das classificações atribuídas a eles, mediadores dos processos cognitivos já definidos anteriormente. Os organizadores prévios OP1 e OP2 foram tipificados como expositivos uma vez que, de acordo com a sondagem realizada, o grupo de estudantes não tinham familiaridade ou hábitos com atividades experimentais no ensino de física ao longo de sua vivência escolar até então. Entretanto, o organizador prévio OP3, em função das aplicações dos outros dois organizadores anteriores, foi denominado de comparativo pela familiaridade deles com o perfil da atividade e da temática envolvida (Moreira, 2008; 2012). Note que essas classificações para os organizadores prévios podem variar de acordo com as características do alunado ao qual serão submetidas tais atividades. Por exemplo, supondo um corpo discente com fortes familiaridades com diferentes estratégias de ensino dentre as quais o uso e a manipulação de experimentos na aprendizagem de física dentro de uma abordagem de ensino investigativa (Carvalho, 2013; Carvalho & Sasseron, 2015), então todos os organizadores prévios, cuja função principal é preparar os aprendizes para a incursão na primeira e segunda lei da termodinâmica, dessa sequência investigativa podem ser do tipo comparativo, desde que também os estudantes forneçam uma base subsunçora mais estável com o conteúdo a ser trabalhado.

Assim sendo, para um grupo de estudantes da rede estadual de Pernambuco com as dificuldades apresentadas como a inexistência de um laboratório de ciências na escola, conhecimentos prévios extremamente superficiais para os subsunçores elencados, limitações associadas aos organizadores prévios, como, por exemplo, as flutuações da parte elétrica em função da fonte chaveada na obtenção da diferença de potencial nos terminais da resistência do calorímetro ou a pouca sensibilidade do termômetro analógico utilizado no calorímetro, e, mesmo assim, os estudantes se saíram muito bem, manipulando os equipamentos, realizando as medições com propriedade, com o uso da proveta, do termômetro, do cronômetro e do voltímetro, participando ativa e coletivamente, debatendo os resultados e os fenômenos físicos, realizando os cálculos da capacidade térmica e do equivalente elétrico do calor, fortalecendo, diante dos obstáculos ditos anteriormente, que o grupo exibiu sinais de uma aprendizagem significativa progressiva, não linear e dentro de uma zona cinza (Moreira, 2012; 2013).

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos estudantes da Escola São Miguel pela participação ativa nas atividades experimentais da sequência didática descrita.

REFERÊNCIAS

Alves, P. P. (2008). *A experiência de Joule revisitada*. 95 f. Dissertação (Mestrado em Física Laboratorial, Ensino e História da Física) – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.

Arribas, S. D. (1988). *Experiências de física ao alcance de todas as escolas* (1ª ed). Rio de Janeiro, RJ: FAE.

Arthury, L. H. M. (2019). A natureza da ciência no ensino de física: entre recortes e sugestões. *Revista do Professor de Física*, 4(2), 1-17.

Axt, R., & Brückmann, M. E. (1989). O conceito de calor nos livros de ciências. *Cadernos Catarinenses de Ensino de Física*, 6(2), 128-142.

Azevedo, M. C. P. S. (2016). *Ensino por investigação: problematizando as atividades em sala de aula* (1ª ed). In: Carvalho, A. M. P. (Org.). *Ensino de Ciências: Unindo a pesquisa e a prática* (19-33). São Paulo: Cengage Learning.

Azevedo, J. S., & Monteiro Júnior, F. N. (2019). Equivalente mecânico do calor: aprimorando um calorímetro elétrico para obtenção da relação entre calor e trabalho. *A Física na Escola*, 17(2), 1-4.

Bolzon, L. B., Gomes, T. T. P., & Prado, A. G. S. (2006). *Determinação do equivalente elétrico do calor: uma proposta experimental para o ensino de físico-química*. In: XXIX Reunião Anual da Sociedade Brasileira de Química – SP, Águas de Lindóia: 2006. Atas... Águas de Lindóia: SBQ.

Cachapuz, A., Gil-Perez, D., Carvalho, A. M. P., Praia, J., & Vilches, A. (2005). *A necessária renovação do ensino das ciências* (1ª ed) (127-151). São Paulo, SP: Cortez Editora.

Campos, A. A., Alves, E. S. & Speziali, N. L. (2018). *Física experimental básica na universidade*. (66-83). Belo Horizonte, MG: UFMG.

Carmo, L. A., Medeiros, A., & Medeiros, C. F. (2000). *Distorções conceituais em imagens de livros textos: o caso do experimento de Joule com o calorímetro das pás*. In: VII Encontro de Pesquisadores em Ensino de Física – SC, Florianópolis: 2000. Atas... Florianópolis: EPEF.

Carvalho, A. M. P. (2013). *O ensino de Ciências e a proposição de sequências de ensino investigativas*. In: Carvalho, A. M. P. (Org.). *Ensino de Ciências por Investigação: Condições para implementação em sala de aula* (1ª ed) (1-20). São Paulo, SP: Cengage Learning.

Carvalho, A. M. P., & Sasseron, L. H. (2015). Ensino de física por investigação: referencial teórico e as pesquisas sobre as sequências de ensino investigativas. *Em Re-Vista*, 22(2), 249-266.

Carvalho, A. M. P. (2018). Fundamentos teóricos e metodológicos do ensino por investigação. *Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências*, 18(3), 765-794.

Carvalho, B. C., & Gomes, L. C. (2014). *Equivalente mecânico do calor: o que dizem os livros didáticos e o que afirma Joule em seus textos*. In: IV Simpósio Nacional de Ensino de Ciências e Tecnologia - SC, Ponta Grossa: 2014. Atas... Ponta Grossa: SINECT.

Carvalho, B. C., & Gomes, L. C. (2017a). A transposição do equivalente mecânico do calor nos livros didáticos de física. *Acta Scientiae*, 19(2), 373-393.

Carvalho, B. C., & Gomes, L. C. (2017b). Análise histórica do conceito de calor nos trabalhos de Joule e implicações para o ensino de física. *Investigações em Ensino de Ciências*, 22(3), 264-290.

Chalmers, A. F. (1993). *O que é ciência afinal?* (1ª ed). São Paulo, SP: Editora Brasiliense.

Cindra, J. L., & Teixeira, O. P. B. (2004). Discussão conceitual para o equilíbrio térmico. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, 21, 176-193.

Cosentino, M. R. & Rios, L. (2020). Experimentos de calorimetria em cursos universitários. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 42, 1-11.

Feynman, R. P. (1999). *Conservação da energia*. In: Feynman, R. P. *Física em seis lições* (1ª ed) (115-137). Rio de Janeiro, RJ: Editora Ediouro.

Gil Perez, D., Montoro, I. F., Alis, J. C., Cachapuz, A., & Praia, J. (2001). Para uma imagem não deformada do trabalho científico. *Ciência & Educação*, 7(2), 125-153.

Halliday, D., & Resnick R. (1983). *A conservação da energia*. In: Halliday, D., & Resnick R. *Física I* (4ª ed) (157-159). Rio de Janeiro, RJ: Editora LTC.

Hewitt, P. (2002a). *Energia*. In Hewitt, P. *Física conceitual* (9ª ed) (114-120). Porto Alegre, RS: Editora Bookman.

Hewitt, P. (2002b). *Temperatura, calor e dilatação*. In: Hewitt, P. *Física conceitual* (9ª ed) (268-272). Porto Alegre, RS: Editora Bookman.

Jewett, J. W., & Serway, R. A. (2011). *A primeira lei da termodinâmica*. In: Jewett, J. W., & Serway, R. A. *Física para cientistas e engenheiros vol 2: oscilações, ondas e termodinâmica* (8ª ed) (129-130). São Paulo, SP: Cengage Learning.

Köhnlein, J. F. K., & Peduzzi, S. S. (2002). Um estudo a respeito das concepções alternativas sobre calor e temperatura. *Revista Brasileira de Investigação em Educação em Ciências*, 2(3), 84-96.

Magno, W. (2008). *Física geral experimental: roteiros dos experimentos* (1ª ed) (38-45). Recife, PE: UFRPE.

Maiztegui, A. P., & Sabato, J. A. (1973). *Calor de origem elétrica*. In: Maiztegui, A. P., & Sabato, J. A. *Física 2* (1ª ed) (279-289). Porto Alegre, RS: Editora Globo.

Marques, N. L. R., & Araújo, I. S. (2009). Física térmica. *Textos de Apoio ao Professor de Física*, 20(5), 1-69.

Martins, R. A. (1984). Mayer e a conservação da energia. *Cadernos de História e Filosofia da Ciência*, 6, série 1, 63-84.

Medeiros, A. (2009). Entrevista com o conde Rumford: da teoria do calórico ao calor como uma forma de movimento. *A Física na Escola*, 10(1), 4-16.

Medeiros, A., & Monteiro Júnior, F. N. (2001). *A reconstrução de experimentos históricos como uma ferramenta heurística no ensino da física*. III Encontro Nacional de Pesquisa em Educação e Ciências - SP, Atibaia: ENPEC, 2001. Atas ... Atibaia: ENPEC. Recuperado de <http://abrapecnet.org.br/enpec/iii-enpec/o12.htm>

Monteiro Júnior, F. N., Caluzi, J. J., & Carvalho, W. L. P. (2000). *O aparato de Lissajous e o ensino experimental das vibrações mecânicas*. VII Encontro Nacional de Pesquisa em Educação em Ciências - SC, Florianópolis: ENPEC, 2000. Atas ... Florianópolis: ENPEC. Recuperado de <http://fep.if.usp.br/~profis/arquivos/vii-enpec/VII%20ENPEC%20-%202009/www.foco.fae.ufmg.br/cd/pdfs/349.pdf>

Moreira, M. A. (2011). Aprendizagem significativa: um conceito subjacente. *Aprendizagem Significativa em Revista*, 1(3), 25-46.

_____. (2005). Mapas conceituais e aprendizagem significativa. *Revista Chilena de Educación Científica*, 4(2), 38-44. Revisado em 2012.

_____. (2008). Organizadores prévios e aprendizagem significativa. *Revista Chilena de Educación Científica*, 7(2), 23-30.

_____. (2012). Al final, que és aprendizaje significativo? *Revista Currículum*, (25), 29-56.

_____. (1998). Energia, entropia e irreversibilidade. *Textos de Apoio ao Professor de Física*, (9), 1-28.

_____. (2013). Aprendizagem significativa em mapas conceituais. *Textos de Apoio ao Professor de Física*, 24(6), 1-49.

_____. (2017). Grandes desafios para o ensino da física na educação contemporânea. *Revista do Professor de Física*, 1(1), 1-13.

_____. (1999). *A teoria da aprendizagem significativa de Ausubel*. In Moreira, M. A. *Teorias de aprendizagem* (1ª ed) (151-165). São Paulo, SP: EPU.

Moura, F. A. (2018). *Sequência de ensino investigativa – SEI*. In: Moura, F. A. *Ensino de física por investigação: Uma proposta para o ensino de empuxo para alunos do ensino médio* (29-43). Belém, PA: UFPA.

Passos, J. C. (2009). Os experimentos de Joule e a primeira lei da termodinâmica. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 31(3), 3603-8.

Peduzzi, L. O. Q., & Raicik, A. C. (2020). Sobre a natureza da ciência: asserções comentadas para uma articulação com a história da ciência. *Investigação em Ensino das Ciências*, 25(2), 19-55.

Queirós, W. P., Nardi, R. & Delizoicov, D. (2014). A produção técnico-científica de James Prescott Joule: uma leitura a partir da epistemologia de Ludwik Fleck. *Investigações em Ensino de Ciências*, 19(1), 99-116.

Queirós, W. P., Nardi, R. & Delizoicov, D. (2019). As influências teóricas e do contexto sociocultural no trabalho técnico científico de James Prescott Joule: contribuições para a formação de professores de Física. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, 36(3), 675-703.

Silva, A. P. B., Forato, T. C. M. & Gomes, J. L. A. M. (2013). Concepções sobre a natureza do calor em diferentes contextos históricos. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, 30(3), 492-537.

Silva, A. P. B., Souza, R. S., & Araujo, T. S. (2014). James Prescott Joule e o equivalente mecânico do calor: reproduzindo as dificuldades do laboratório. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 36(3), 3309-9.

Ualg. (2006). *Equivalente eléctrico do calor*. Recuperado de http://www.fcetec.ualg.pt/fisica/PDFdoc/Equivalente_Electrico_do_Calor.pdf

USP. (2003). *Experimentoteca: calorimetria: equivalente eléctrico do calor*. São Paulo, SP. Recuperado de http://www.cdcc.usp.br/exper/medio/fisica/kit3_calorimetria/exp7_termo.pdf

USP. (2017). *Laboratório de física I: experiência 5: calorimetria, ajuste da reta e propagação de erros*. Recuperado de <https://docplayer.com.br/48569301-Laboratorio-de-fisica-i-experiencia-5-calorimetria-ajuste-da-reta-e-propagacao-de-erros-11-de-dezembro-de-2015.html>

UFABC. (2019). *Fenômenos térmicos: experiência 3: calorimetria*. Recuperado de <https://feterm.files.wordpress.com/2019/03/roteiro03.pdf>

UTFPR. (2018). *Equivalente eléctrico do calor*. Recuperado de http://hpc.ct.utfpr.edu.br/~rsilva/exp_11.pdf

Tipler, P. A. (1990). *A corrente eléctrica*. In: Tipler, P. A. *Física volume 2* (2ª ed) (689-692). Rio de Janeiro, RJ: Editora Guanabara Koogan S.A.

Valadares, J. (2012). *Os Modelos Investigativos Atuais no Ensino de Física e o Recurso à História e a Filosofia da Ciência*. In: L. O. Q. Peduzzi, A. F. P. Martins e J. M. H. Ferreira (Org.). *Temas de História e Filosofia da Ciência* (85-121). Natal, RN: Editora da UFRN.