



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

Decanato de Pesquisa e Pós-Graduação

Instituto de Ciências Biológicas

Faculdade UnB Planaltina

Faculdade de Educação

Instituto de Química

Instituto de Física

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM EDUCAÇÃO EM CIÊNCIAS

DOUTORADO EM EDUCAÇÃO EM CIÊNCIAS

**UMA INVESTIGAÇÃO SOBRE A APRENDIZAGEM DA
REFLEXÃO LUMINOSA NO ENSINO MÉDIO A
PARTIR DA ARQUITETURA BRASILIENSE**

JAIR LÚCIO PRADOS RIBEIRO

Brasília - DF

2019



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

Decanato de Pesquisa e Pós-Graduação

Instituto de Ciências Biológicas

Faculdade UnB Planaltina

Faculdade de Educação

Instituto de Química

Instituto de Física

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM EDUCAÇÃO EM CIÊNCIAS

DOUTORADO EM EDUCAÇÃO EM CIÊNCIAS

**UMA INVESTIGAÇÃO SOBRE A APRENDIZAGEM DA
REFLEXÃO LUMINOSA NO ENSINO MÉDIO A
PARTIR DA ARQUITETURA BRASILIENSE**

JAIR LÚCIO PRADOS RIBEIRO

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Educação em Ciências da Universidade de Brasília, apresentada à banca examinadora como requisito parcial à obtenção do Título de Doutor em Educação em Ciências, sob a orientação do Prof. Dr. Gerson Souza Mól.

Brasília – DF

2019

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

FICHA CATALOGRÁFICA

Ribeiro, Jair L. P.

Uma investigação sobre a aprendizagem da reflexão luminosa no ensino médio a partir da arquitetura brasiliense / Jair Lúcio Prados Ribeiro – Brasília, 2019. Tese de Doutorado, apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Educação em Ciências da Universidade de Brasília/UnB.

1. Ensino de Óptica. 2. Ensino de Física 3. Óptica. 4. Ensino Médio. 5. Arquitetura. I. Título.

Folha de Aprovação

Comunicamos a aprovação da Defesa de Tese do (a) aluno (a) **Jair Lúcio Prados Ribeiro**, matrícula nº **15/0184816**, intitulada “**UMA INVESTIGAÇÃO SOBRE A APRENDIZAGEM DA REFLEXÃO LUMINOSA NO ENSINO MÉDIO A PARTIR DA ARQUITETURA BRASILENSE**”, apresentada no (a) Auditório Azul do Instituto de Química (IQ) da Universidade de Brasília (UnB) em 17 de maio de 2019.

Prof. Dr. Gerson de Souza Mól
Presidente de Banca (IQ/UnB)

Prof. Dr. Marcelo Ximenes Aguiar Bizerril
Membro Titular (FUP/UnB)

Prof. Dr. Cássio Costa Laranjeiras
Membro Titular (IF / UnB)

Prof. Dr. Márcio Tavares de Castro
Membro Titular (IFB/DF)

Prof. Dr. Fábio Ferreira Monteiro
Membro Suplente (IF/UnB)

Em 17 de maio de 2019.

DEDICATÓRIA

Dedico essa tese aos meus pais,
Vilma Lúcia e Jair Ribeiro (*in memoriam*),
pela paciência, amor e apoio, hoje e sempre.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Wildson Luis Pereira da Silva, *in memoriam*, primeiro coordenador do Programa de Pós-Graduação em Educação em Ciências, por seus esforços profissionais e pessoais que vieram a viabilizar minha permanência no curso.

Ao meu orientador, Gerson Mól, pelo acolhimento não apenas da minha proposta de pesquisa, mas também do meu jeito de ser, especialmente em um período bastante conturbado em minha vida, seja em termos pessoais, profissionais ou acadêmicos.

À minha primeira orientadora no Programa, Maria Helena da Silva Carneiro, pelas conversas quase semanais que tivemos durante os dois primeiros anos do curso, as quais se tornaram a espinha-dorsal do trabalho aqui exposto.

À minha (des)orientadora para sempre, no Mestrado e na vida, madrinha acadêmica e de casamento, Maria de Fatima da Silva Verdeaux, por muito mais do que poderia descrever aqui.

Aos meus irmãos, Jailma e Arlim (*in memoriam*), por tantos “complementos” à minha formação pessoal.

Aos colegas da minha turma de Doutorado, a primeira do programa: Antônio, Assicleide, Eleandro, Eloiza, Isabella, Jacqueline, Mayara (colega “honorária”), Nília, Paulo Vitor, Simone e Verenna, pelas estimulantes conversas e estímulos, e claro, por me ajudarem a eternizar uma piada interna sobre Pierre Bourdieu.

Ao Arthur Sardinha, servidor incansável na Secretaria do Programa, sobremaneira por ter facilitado o caminho burocrático das pedras durante o curso.

Aos professores da Universidade de Brasília, em especial àqueles em que tive a honra de participar como discente em suas disciplinas: Roberto Silva – *Bob*, Cássio Laranjeiras, Eduardo Rossato, Fernanda Derntl e Nilda Diniz.

À direção da escola na qual foi aplicada a pesquisa, em especial na figura de Andrea Studart Galvão, uma profissional ímpar e que se revelou uma grande estimuladora da minha carreira acadêmica.

Aos dez estudantes (pseudônimos: Carlos, Cecília, Clarice, Érico, Fernando, Jorge, Luís, Manuel, Raul e Vinícius) que se voluntariaram para a pesquisa por sua disposição e respostas diretas, claras e bem humoradas.

A Wesleyne Miranda, pela paciência e dedicação ao trabalho de transcrição preliminar dos áudios da pesquisa.

A Oscar Niemeyer, *in memoriam*, o arquiteto que adornou Brasília com seu gênio e criatividade. Sem as inspiradoras criações do artista, essa tese não existiria.

RESUMO

Tomando como pressuposto que a formação de cidadãos protagonistas envolve a capacidade de interpretar a sua vivência cotidiana a partir de conceitos das Ciências Naturais, defendemos que uma cidade dispõe de possibilidades educadoras poucas vezes exploradas no Ensino de Ciências. Assim, o espaço urbano é percebido como um laboratório de investigação e um espaço de aprendizagem privilegiado, em especial as estruturas arquitetônicas nele presentes. Como tese, defendemos que o desenvolvimento de um trabalho pedagógico no Ensino Médio inspirado por uma estrutura arquitetônica, por meio de dois processos didáticos (visitas de campo e trabalho experimental com maquetes) contribui para a aprendizagem colaborativa da reflexão luminosa e permite estabelecer uma nova leitura do indivíduo sobre a cidade. Como a pesquisa se desenvolveu em um sítio arquitetônico brasileiro, a Procuradoria Geral da República (PGR), um breve capítulo é dedicado à contextualização dessa estrutura. Apresentamos a seguir uma revisão bibliográfica em duas partes: na primeira, identificam-se as relações entre o ensino de Física e a Arquitetura, e na segunda parte, investiga-se o ensino da reflexão luminosa a partir de artigos presentes em periódicos da área de ensino de Física. A revisão evidenciou três pontos principais: a virtual inexistência de trabalhos que correlacionem a Arquitetura e a Óptica; a importância das atividades experimentais com materiais cotidianos no ensino da reflexão; e a ausência de propostas com visitas de campo para se estudar o tema. O referencial teórico é então apresentado, baseado na reconceitualização do trabalho experimental de Derek Hodson, em um recorte das ideias de Lev Vigotski sobre a aprendizagem colaborativa e no conceito de Cidades Educadoras. A metodologia de pesquisa, conduzida com dez estudantes de Ensino Médio de uma escola da rede particular de Brasília, foi dividida em cinco etapas: estudo-piloto, visita de campo, questionário anterior, atividades experimentais usando maquetes da PGR no âmbito de um laboratório de Física (cujas respostas foram transcritas para texto) e questionário posterior. A análise das transcrições se deu de forma qualitativa com o auxílio do software *webQDA*. Cada um dos três referenciais compôs um viés de análise independente, aos quais se somaram dois outros vieses: Maquetes e visita de campo e Conceitos de Óptica Geométrica. Após a análise, identificamos que nossa proposta favoreceu principalmente a aprendizagem da natureza e do ideário da Ciência, sem tanto destaque para a sua prática. No tocante à aprendizagem colaborativa, os resultados mostraram maior colaboração entre os

estudantes e o professor do que entre o estudante e seus pares, apontando ainda para o destacado papel do professor como um organizador do coletivo nas situações de colaboração. A análise das falas revelou também que os estudantes acreditam que o projeto mudou suas percepções sobre a cidade, destacando em especial o estabelecimento de relações entre as teorias científicas e os objetos arquitetônicos. As falas mostraram ainda que os estudantes atribuem à visita de campo um caráter de internalidade (no qual eles eram observadores que faziam parte do fenômeno observado), enquanto as maquetes apresentam o caráter oposto, de externalidade. Identificamos também dois importantes entraves para a aprendizagem da reflexão luminosa em espelhos curvos: o conflito entre as propriedades do centro e do foco de uma superfície e a diferenciação entre reflexão especular e difusa.

Palavras-chave: Ensino de Óptica, reflexão da luz, Arquitetura, Brasília.

ABSTRACT

Assuming that the formation of protagonist citizens involves the ability to interpret their daily lives based on concepts of the Natural Sciences, it is argued that a city has educational possibilities seldom explored in Science teaching. Thus, urban space is perceived as a research laboratory and a privileged learning space, especially the architectural structures present in it. As a thesis, it is argued that the development of a pedagogical work in the high school inspired by an architectural structure, through two didactic processes (field visits and experimental work with mockups) contributes to collaborative learning of light reflection and allows the individual to establish a new reading about the city. As the research was developed in a Brazilian architectural site, the Attorney General's Office (AGO), a brief chapter is dedicated to this structure contextualization. A bibliographical review is presented in two parts: the first one identifies the relations between the teaching of Physics and Architecture, and the second part investigates the teaching of light reflection from articles in the area of Physics teaching. The review revealed three main points: the virtual inexistence of works that correlate Architecture and Optics; the importance of experimental activities with everyday materials in the teaching of reflection; and the absence of proposals with field trips to study this theme. Three theoretical references are then presented: the concept of Educating Cities, Derek Hodson's reconceptualization of experimental work and an excerpt of Lev Vigotski's ideas on collaborative learning. The research methodology, conducted with ten high school students from a private school in Brasilia, was divided into five stages: pilot study, field visit, previous questionnaire, experimental activities using AGO mockups in a Physics laboratory (whose answers were transcribed to text) and a later questionnaire. The analysis of the transcriptions was done in a qualitative way using *webQDA* software. Each of the three references comprised a bias of independent analysis, to which two other biases were added: Mockups and field visits and Concepts of Geometrical Optics. After the analysis, we identified that our proposal mainly favored the learning of the nature and the ideas of Science, without so much emphasis for its practice. With regard to collaborative learning, the results showed greater collaboration between the students and the teacher than between peers, pointing to the outstanding role of the teacher as an organizer of the collective in collaboration situations. The analysis of the statements also revealed that the students believe that the project changed their perceptions about the city, emphasizing in particular the

establishment of relations between scientific theories and the architectural objects. The statements also showed that the students attribute to the field visit an internality character (in which they were observers that were part of the phenomenon observed), while the mockups have an externality opposite character. We also identified two important obstacles to the learning of light reflection in curved mirrors: the conflict between the properties of the center and the focus of a surface and the difference between specular and diffuse reflection.

Keywords: Light reflection, Optics teaching, Architecture, Brasília.

SUMÁRIO

1. Apresentação	14
2. Introdução	18
3. Sítios arquitetônicos brasilienses	24
4. Reflexão luminosa e Ensino de Física	34
4.1. Relações entre Arquitetura e Ensino de Física	36
4.2. A reflexão luminosa nos periódicos de Ensino de Física	39
4.2.1. Princípios da reflexão	42
4.2.2. Reflexão difusa.....	45
4.2.3. Imagens reais e virtuais	47
4.2.4. Espelhos planos	50
4.2.5. Espelhos curvos	54
4.2.7. Associações de espelhos	60
4.2.8. Alguns comentários	62
5. Referenciais teóricos	64
5.1. Derek Hodson e a reconceitualização da experimentação	64
5.2. Lev Vigotski e aprendizagem colaborativa	71
5.3. Cidades Educadoras	77
6. Metodologia de geração de dados	83
6.1. Estudo-piloto	83
6.1.1. Análise prévia do estudo-piloto	84
6.2. Pesquisa definitiva	87
6.2.1. Visita de campo	89
6.2.2. Questionário prévio.....	95
6.2.3. Atividades experimentais	98
6.2.4. Questionário posterior	102
7. Análise e resultados	104
7.1. Reconceitualização do trabalho experimental	112
7.1.1. Natureza da Ciência	114
7.1.1.1. Descrição de fenômenos	114
7.1.1.2. Construção de hipóteses	115
7.1.1.3. Experimentação espontânea	119
7.1.1.4. Teoria e realidade	120
7.1.2. Ideário da Ciência	122
7.1.2.1. Ideias prévias	122

7.1.2.2. Reelaboração	125
7.1.2.3. Compreensão	130
7.1.3. Prática da Ciência	132
7.1.3.1. Confronto	132
7.1.3.2. Sociabilidade	134
7.2. Aprendizagem colaborativa	135
7.2.1. Personagens	137
7.2.2. Tipologia	140
7.2.2.1. Escambo conceitual	140
7.2.2.2. Escambo estratégico	142
7.2.2.3. Organização do coletivo	143
7.3. Cidades Educadoras	144
7.3.1. Arquitetura e Ciência	145
7.3.2. Planejamento	146
7.3.3. Estética	147
7.3.4. Sentir a cidade	149
7.3.5. Aprender na cidade.....	150
7.4. Maquetes e visita de campo	152
7.4.1. Aula não tradicional	153
7.4.2. Teoria "na prática"	154
7.4.3. Internalidade	156
7.4.4. Externalidade	156
7.4.5. Representação	158
7.5. Conceitos de Óptica Geométrica	160
7.5.1. Fenômenos ópticos	162
7.5.1.1. Reflexão	162
7.5.1.2. Outros fenômenos	167
7.5.2. Superfícies refletoras	168
7.5.3. Imagem	169
8. Conclusões e perspectivas	171
9. Referências	189

APÊNDICES

Apêndice A	194
Detalhes construtivos da maquete da Procuradoria Geral da República	
Apêndice B	199
Protocolo de investigação do estudo-piloto	
Apêndice C	212
Protocolo de investigação da pesquisa	
Apêndice D	217
Questionário prévio às atividades experimentais	
Apêndice E	222
Termo de consentimento livre e esclarecido	
Apêndice F	226
Questionário posterior às atividades experimentais	

1. APRESENTAÇÃO

O *insight* que levou a essa tese se originou na sala de aula - de forma mais específica, na nossa prática pedagógica em Óptica no Ensino Médio. Como motivação inicial para uma aula sobre os princípios da reflexão, apresentamos aos estudantes um inusitado caso do prédio londrino *20 Fenchurch Street*, apelidado pela imprensa inglesa de *Fryscrapers*¹ (figura 1). Esse prédio, projetado pelo arquiteto Rafael Viñoly, possui uma grande fachada espelhada em formato côncavo e se tornou popular após relatos de que áreas próximas ao edifício tinham se tornado extremamente quentes após a sua construção. Segundo Guerra (2013), a temperatura atingida em alguns pontos era suficiente para fritar um ovo ou derreter peças plásticas de um automóvel.

Figura 1. Em destaque no centro da fotografia, o prédio comercial londrino *20 Fenchurch Street*, com uma fachada côncava. Projeto de Rafael Viñoly, inaugurado em 2014.



Fonte: <http://i.dailymail.co.uk/i/pix/2014/10/09/video-undefined-2215967F00000578-79_636x358.jpg>. Acesso: 14/12/2015.

Os estudantes se revelaram intrigados pela possibilidade de uma fachada espelhada produzir tal incremento de temperatura, o qual decorre da concentração da radiação solar infravermelha refletida pelos vidros, associada ao formato côncavo da edificação. Fizemos então uma primeira atividade experimental para simular a situação real, usando um espelho parabólico para concentrar a luz solar² e incendiar um pequeno pedaço de papel colocado no foco do mesmo. A figura 2 representa uma situação

¹ Esse criativo termo usado pela imprensa combina as palavras *fry* (fritar) e *skyscraper* (arranha-céu).

² Admitimos que a experiência descrita nem sempre funciona a contento: o ideal é realizá-la em um dia sem nuvens, nas horas mais quentes do dia.

similar à descrita. A comparação entre essa atividade experimental demonstrativa e a situação real foi fruto de diversos questionamentos por parte dos alunos, gerando um estado de motivação e curiosidade que chegou até mesmo a nos surpreender.

Figura 2. Demonstração experimental da concentração da radiação solar, tal como na fachada do *Fryscrapper*, usando um espelho parabólico didático.



Fonte: <<http://www.coolest-gadgets.com/wp-content/uploads/Solar-Spark-Lighter-400x283.jpg>>. Acesso: 23/02/2016.

Tal surpresa se justifica, pois embora nossas atividades profissionais e acadêmicas prévias à confecção dessa tese tenham sido comumente ligadas à aprendizagem em Óptica Geométrica mediada pela experimentação, é raro observamos tal “empolgação” por parte dos estudantes com um tópico de estudo. Em especial, observamos que os alunos se mostraram muito mais motivados durante essa primeira atividade do que durante a segunda atividade demonstrativa experimental da aula, na qual determinamos a distância focal de um espelho esférico didático em um banco óptico, equipamento tradicional em laboratórios de Física.

Acreditamos que a segunda atividade experimental tenha se revelado desinteressante para os estudantes por não apresentar um diálogo evidente com a realidade cotidiana, talvez até mesmo uma desconexão com a mesma, ao contrário da primeira atividade experimental demonstrativa. Nesse ponto, vale indicar que o desafio pedagógico parece ser realizar a convergência entre a curiosidade (presente na primeira atividade experimental) e o espírito de investigação (constante da segunda atividade).

A situação de sala de aula descrita não ocorreu sob o *fog* londrino e sim no período de seca do Planalto Central, mais especificamente na área central de Brasília.

Assim, começamos a nos indagar se as edificações brasileiras também apresentariam fenômenos ópticos que fossem instigantes para os estudantes e que pudessem, de preferência, ser apresentados de forma experimental na própria sala de aula. Iniciamos também uma reflexão sobre como uma estrutura arquitetônica poderia ser incorporada em atividades experimentais acerca dos fenômenos associados à reflexão luminosa. Em conjunto, também começamos a nos questionar se a inclusão de tal estrutura como objeto de estudo poderia contribuir para a aprendizagem desse tema no Ensino Médio. Dessas primeiras ponderações, as quais podem ser interpretadas como o fato gerador dessa pesquisa, nasceu o estudo acadêmico aqui relatado.

A princípio, pensávamos em empregar um prédio em formato côncavo análogo ao *Fryscrapper* como objeto de estudo. O basilar exemplo desse tipo de fachada em Brasília está na sede do Tribunal Superior do Trabalho (TST), um projeto de Oscar Niemeyer (figura 3). Esse edifício se apresenta como um grande espelho côncavo, mas sem produzir áreas superaquecidas no seu entorno, por estar recoberto com vidros escuros e também pelo fato da sua fachada ser voltada para o ponto cardinal Sul.

Figura 3. Sede do Tribunal Superior do Trabalho em Brasília.



Fonte: fotografia do autor (2016).

Entretanto, percebemos que o revestimento escuro dos vidros do edifício dificultava a observação de fenômenos ópticos refletivos, tornando a proposta original de difícil execução. Assim, apesar de a motivação inicial dessa pesquisa ter sido um prédio assemelhado a um espelho côncavo, a proposta didática aqui relatada foi desenvolvida a partir dos dois edifícios principais da Procuradoria Geral da República (PGR), também desenvolvidos a partir de um projeto de Oscar Niemeyer. As fachadas

dessas edificações são revestidas com uma película refletora e podem ser interpretadas como uma associação de dois espelhos cilíndricos convexos (figura 4).

Figura 4. Fachadas dos prédios principais da Procuradoria Geral da República, em Brasília. A foto à esquerda mostra a fachada vista a partir da via L4 Sul, enquanto a imagem à direita mostra a visão a partir do estacionamento nos fundos do complexo arquitetônico da PGR.



Fonte: fotografias do autor (2016).

Uma razão adicional pela qual decidimos pela incorporação do conjunto arquitetônico da PGR como objeto de estudo se deve à publicação prévia de dois trabalhos, nos quais apresentamos um conjunto de atividades experimentais que poderiam ser desenvolvidas a partir de uma maquete representativa dos dois edifícios principais (RIBEIRO, 2015c) ou com o auxílio de uma fotografia aérea do complexo de edifícios (RIBEIRO, 2016e).

Nesses trabalhos anteriores, algumas atividades experimentais didáticas foram descritas, mas sua aplicação efetiva na sala de aula não foi estudada; esse último papel coube, portanto, à pesquisa relatada nessa tese, que passamos então a relatar.

2. INTRODUÇÃO

A arquitetura é o próprio espelho da vida. Você precisa apenas lançar seus olhos nos prédios para sentir a presença do passado, o espírito de um lugar; eles são o reflexo da sociedade (PEI e BOEHM, 2000) ³.

Escolhida a estrutura arquitetônica específica com a qual trabalharíamos, voltamos nossa atenção para os inevitáveis porquês de se trabalhar de tal forma, os quais são inerentes a qualquer proposta pedagógica que se pretenda inovadora. Nesse âmbito, encontramos uma primeira justificativa no trabalho de Gadotti (2005) sobre as *Cidades Educadoras*, conceito que será apresentado com mais detalhes no capítulo 6, dedicado aos nossos referenciais. Gadotti (2005) defende que o estudante não possa ignorar - ou mesmo não perceber - a cidade em que vive. Assim, nossa proposta visa não só à aprendizagem de temas específicos de Óptica, mas também busca a sensibilização do estudante sobre o ambiente urbano que o circunda.

Na busca por respostas adicionais aos supracitados porquês, encontramos suportes também em documentos oficiais. A atual Lei de Diretrizes e Bases da Educação (BRASIL, 1997) prevê que o ensino seja ministrado a partir de um pluralismo de concepções pedagógicas e que seja buscada uma *relação entre a teoria e a prática*, conjecturas que acreditamos terem sido contempladas na proposta pedagógica aqui descrita. Já nos Parâmetros Curriculares Nacionais para o Ensino Médio (BRASIL, 2000a), defende-se que:

O contexto que é mais próximo do aluno e mais facilmente explorável para dar significado aos conteúdos da aprendizagem é o da vida pessoal, cotidiano e convivência. [...] O cotidiano e as relações estabelecidas com o ambiente físico e social devem permitir dar significado a qualquer conteúdo curricular, fazendo a ponte entre o que se aprende na escola e o que se faz, vive e observa no dia-a-dia (BRASIL, 2000a, p.81).

Ora, a interação com as estruturas arquitetônicas que povoam um ambiente urbano é, a nosso ver, a própria expressão da vida cotidiana – ou, como o centenário arquiteto chinês Ieoh Ming Pei ⁴ tão bem descreve na citação que inicia esse capítulo, a Arquitetura é um “espelho da vida”. O simples andar pela cidade já obriga ao

³ Tradução nossa.

⁴ O arquiteto Ieoh Ming Pei faleceu em 16 de maio de 2019, na véspera da defesa dessa tese, aos 102 anos. Sua obra mais conhecida é a Pirâmide de Vidro que funciona como entrada do Museu do Louvre, em Paris.

estabelecimento de relações com os objetos arquitetônicos desse ambiente físico, mesmo por vias não intencionais ou processos inconscientes. Logo, oportunidades de significar tal ambiente podem favorecer sua contextualização, ou seja, “a aplicação de conhecimentos constituídos na escola às situações da vida cotidiana e da experiência espontânea permite seu entendimento, crítica e revisão” (BRASIL, 2000a, p.104). O mesmo documento, em outro volume, reforça a necessidade de se incorporar o espaço que cerca o estudante às práticas pedagógicas:

Para isso, é imprescindível considerar o mundo vivencial dos alunos, sua realidade próxima ou distante, os objetos e fenômenos com que efetivamente lidam, ou os problemas e indagações que movem sua curiosidade. Esse deve ser o ponto de partida e, de certa forma, também o ponto de chegada (BRASIL, 2000b, p.28).

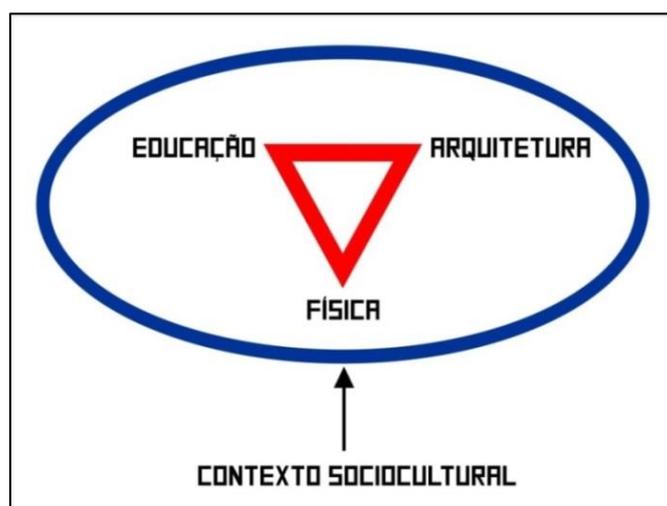
Reforçando ainda o ineditismo da nossa proposta, deve ser ressaltado que alguns livros didáticos de Ensino Médio que consultamos apresentam fotografias de fachadas arquitetônicas como exemplificação do fenômeno da reflexão, mas não as aproveitam para outros fins pedagógicos. Em Ramalho *et al.* (2007, p.238), é mostrada a imagem de um edifício refletido na fachada espelhada de outro prédio. Em Máximo e Alvarenga (2005, p. 163), está presente uma fotografia do Palácio da Alvorada (residência oficial da Presidência em Brasília) no espelho d’água à frente da edificação. A imagem que consta em Xavier e Barreto (2008, p. 261) é similar, apresentando o templo chinês Chongsheng e sua imagem virtual, gerada devido à reflexão em um lago próximo.

Acreditamos, portanto, que o diálogo entre as linguagens da Arquitetura e da Física a partir de um trabalho pedagógico permite aos estudantes o desenvolvimento de ferramentas não usuais de crítica da paisagem urbana. Em termos pictóricos, a interação entre os três pontos de vista trabalhados nessa tese (Arquitetura, Física e Educação) pode ser representada no esquema constante da figura 5: afinal, buscamos investigar e apresentar nesse texto as influências mútuas que tais ramos de pensamento apresentam, mas frisando-se a relevância do contexto sociocultural no qual esses diálogos são estabelecidos – no caso, o espaço urbano brasileiro.

A semelhança do triângulo vermelho do esquema da figura 5 com a placa de regulamentação de trânsito intitulada *Dê a preferência* é intencional: em diferentes momentos dessa tese (e também da nossa investigação), uma das temáticas parecia se revelar privilegiada em relação às outras. Acreditamos que tal privilégio é apenas aparente, mas ressalta-se que o fato da geração de dados ter sido feita em contextos

pedagógicos formais, durante aulas da disciplina de Física no Ensino Médio, tendo as estruturas arquitetônicas um papel que pode, a princípio, ser encarado como menos preferencial na discussão. Assim, esse conjunto de considerações deu gênese à pergunta central dessa tese: **em que medida o desenvolvimento de atividades pedagógicas inspiradas por uma estrutura arquitetônica contribui para a aprendizagem da reflexão luminosa no Ensino Médio?**

Figura 5. Esquema de interligação entre as temáticas da tese.



Fonte: desenho do autor (2017).

A nosso ver, tal questionamento se justifica, na medida em que o diálogo entre a Arquitetura e a Óptica Geométrica em um contexto pedagógico ainda não se encontra estabelecido, conforme detalhamos no capítulo voltado à revisão bibliográfica. Se nos limitarmos então a atividades experimentais inspiradas por estruturas arquitetônicas, iremos nos deparar com uma área de pesquisa quase inexistente, em especial na educação básica. Assim, entendemos que, ao menos nessa questão, a proposta aqui descrita apresenta um caráter de ineditismo, funcionando como um catalisador de ideias, em um campo de discussão ainda incipiente.

Pelo fato da nossa pesquisa ter sido desenvolvida a partir de uma estrutura arquitetônica construída na própria cidade em que os estudantes residem, percebemos a possibilidade de garantir uma visita de campo ao complexo da PGR em momento prévio às atividades experimentais. Assim, decidimos pela incorporação do complexo

arquitetônico como objeto de estudo a partir de dois processos didáticos: visita de campo e trabalhos com modelos experimentais (maquetes) ⁵ pré-construídos.

Os dois processos didáticos supracitados, a nosso ver, são facilitadores de situações onde a *aprendizagem colaborativa* pudesse vir a ocorrer. Percebemos, então, que um recorte da obra deixada por Lev Vigotski poderia nos ajudar nas nossas análises das interações que esperávamos observar nos grupos de estudantes, razão pela qual incluímos o psicólogo russo em nossos referenciais teóricos. Tomamos também como marco teórico o trabalho de Derek Hodson a respeito da importância das atividades experimentais no Ensino de Ciências. Por fim, adotamos como referência o conceito de Cidade Educadora, *i.e.*, o entendimento de que o espaço urbano é um ambiente repleto de possibilidades pedagógicas.

Inspirados pelos suportes relatados acima, apresentamos e buscamos defender a tese: **o desenvolvimento de um trabalho pedagógico no Ensino Médio inspirado por uma estrutura arquitetônica, por meio de dois processos didáticos (visitas de campo e trabalho experimental com maquetes) contribui para a aprendizagem colaborativa da reflexão luminosa e permite estabelecer uma nova leitura do indivíduo sobre a cidade.**

Pode-se questionar, em especial, se a última parte da hipótese pode ser evidenciada; defendemos que sim, e perguntas específicas acerca desse “novo olhar” sobre a cidade foram incluídas nos nossos protocolos de pesquisa, apresentados no sexto capítulo, dedicado à nossa metodologia. Contudo, deve-se frisar que não tínhamos como pretensão nessa pesquisa a modificação por completo da relação dos jovens com a cidade, mas apenas o estabelecimento de situações pedagógicas inspiradas por uma estrutura urbana, para que eles próprios pudessem vir a refletir sobre o espaço urbano no qual estão inseridos.

Acreditamos que a possibilidade de desenvolvimento de ferramentas novas, por parte dos estudantes, para a crítica do espaço urbano e das obras que o compõem seja uma justificativa adicional para a pesquisa. É inevitável que obras arquitetônicas modifiquem a paisagem, por vezes de forma radical ⁶. Ademais, o espelhamento das fachadas de edifícios leva à conjugação de imagens geradas por reflexão, as quais são

⁵ Optamos pelo uso do termo *maquete* ao longo dessa tese devido às conotações específicas que o termo *modelo* apresenta na literatura em Ensino de Ciências.

⁶ Frisa-se que essa intervenção intencional na paisagem urbana é um princípio fundamental da arquitetura modernista, égide teórica sobre a qual Brasília foi projetada.

parte integrante da paisagem, mas não parecem ser levadas em conta nos projetos arquitetônicos, pois mesmo as ilustrações realizadas de forma digital para o projeto de um novo edifício não costumam apresentar o entorno refletido nessas superfícies.

Por conseguinte, estabelecemos dois objetivos gerais para a nossa pesquisa. O primeiro objetivo é analisar se um trabalho pedagógico desenvolvido a partir de uma estrutura arquitetônica favorece a aprendizagem da Óptica no Ensino Médio, em especial acerca do tema da reflexão luminosa. Um segundo objetivo geral é o desenvolvimento de uma nova maneira de olhar a cidade por parte dos estudantes, permitindo identificar novas maneiras de se aprender com a cidade, no contexto do ensino da Óptica Geométrica.

Com vistas a um paralelismo textual com as conclusões dessa tese, optamos por enumerar os objetivos específicos desse trabalho de pesquisa, a seguir:

1. Identificar os conceitos de reflexão luminosa que apresentam entraves para os estudantes.
2. Levantar as opiniões dos estudantes sobre uma atividade experimental inspirada por uma estrutura arquitetônica.
3. Verificar a ocorrência de interações espontâneas dos estudantes com as maquetes.
4. Identificar oportunidades para a aprendizagem colaborativa na visita de campo e nas atividades pedagógicas no laboratório.

Nas conclusões dessa tese, buscamos apresentar respostas para cada um desses objetivos, tanto gerais como específicos.

Com vistas à fluidez na leitura, optamos que o desenvolvimento dessa tese não se afastasse do modelo acadêmico tradicional, mas consideramos importante incluir uma breve contextualização prévia sobre a Arquitetura brasiliense e do sítio arquitetônico da PGR no capítulo a seguir. No capítulo 4, apresentamos uma revisão bibliográfica desenvolvida em duas frentes: as relações entre o ensino de Física e a Arquitetura e o tratamento do fenômeno da reflexão luminosa em periódicos de Ensino de Física. No capítulo 5, voltamos nossas atenções para os três referenciais teóricos adotados (reconceitualização do trabalho experimental, aprendizagem colaborativa e Cidades Educadoras). Já no capítulo 6 apresentamos nossa metodologia de geração de dados, enquanto no capítulo 7, apresentamos a análise qualitativa dos dados gerados. Por fim, no capítulo 8, relatamos as conclusões da pesquisa, fazemos algumas

considerações finais e conjecturamos alguns caminhos de pesquisa que esse trabalho poderá vir a lançar para o futuro.

3. SÍTIOS ARQUITETÔNICOS BRASILIENSES

Política à parte, Brasília é Arquitetura. O período hegemônico do modernismo brasileiro no século XX - movimento arquitetônico que, segundo Lara (2005), “foi sem dúvida o fenômeno arquitetônico mais importante que o Brasil já teve até hoje” – é marcado pelo projeto e edificação de Brasília. A capital pode ser entendida não apenas como a *magnum opus* desse movimento no país, mas também como uma referência mundial na Arquitetura moderna, tanto que, segundo Gorelik (2007, p.411), a cidade é “uma das maiores exposições de modernismo a céu aberto”.

Ao longo de mais de seis décadas de existência (o concurso que lhe deu origem completou sessenta anos em 2017), Brasília se tornou uma cidade singular na literatura acadêmica. Mesmo antes da sua construção, já havia uma polarização feroz entre defensores e críticos do seu projeto urbanístico, de seus monumentos, de suas pretensões sociais e até mesmo da necessidade de uma nova capital. A leitura de alguns artigos da antologia elaborada por Xavier e Katinsky (2012) por ocasião do cinquentenário da cidade, em 2010, assim o demonstra: as mazelas da metrópole vêm sendo ressaltadas na literatura com tanta veemência quanto seus triunfos, desde seu momento de concepção urbanística, nos anos 1950. É inegável, entretanto, o quanto a Arquitetura da cidade a destaca das demais, como Oscar Niemeyer afirma:

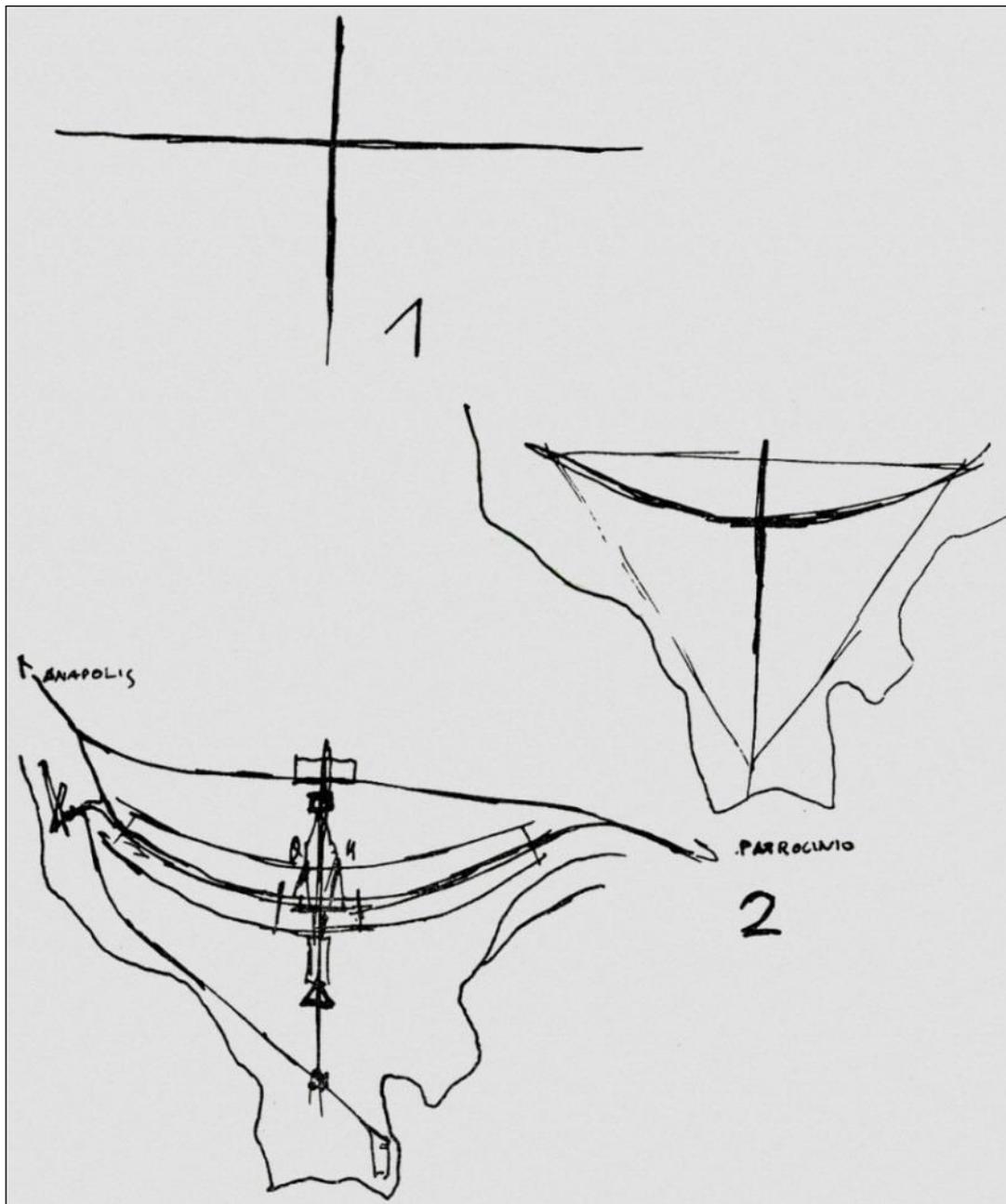
Para os que visitavam Brasília, gostassem ou não dos meus projetos, tranquilizava-me a certeza de que não poderiam dizer terem visto antes coisa parecida. Deles queria ouvir o que ouvi de Le Corbusier subindo a rampa do Congresso: “Aqui há invenção” (NIEMEYER, 1978, p.44).

O plano urbanístico de Lucio Costa (figura 6), vencedor do concurso público realizado em 1957 para a nova capital brasileira, e as criações de Oscar Niemeyer para os prédios públicos (figura 7) se tornaram referências da Arquitetura moderna nas décadas seguintes. Niemeyer já era nos anos 1950 a referência principal da Arquitetura modernista brasileira, desde a sua consagração em obras importantes, em especial o conjunto urbanístico e arquitetônico da Pampulha, em Belo Horizonte.

O projeto da Pampulha é crucial por marcar o início das colaborações entre Juscelino Kubitschek (JK) e Niemeyer, quando o primeiro era prefeito da capital mineira. Em 1956, durante a sua campanha à presidência, JK viria a incluir a construção da nova capital no seu plano desenvolvimentista. Brasília era encarada então como um polo de desenvolvimento do interior do país (OLIVEIRA, 1975) e a Meta-Síntese do

governo (TAVARES, 2007). Freyre (1960, p.49), entretanto, acredita em uma visão complementar: “o entusiasmo pessoal do presidente Juscelino Kubitschek é, em grande parte, responsável pela construção de Brasília”. Como consequência, a historiografia tradicional sobre Brasília veio a tornar o nome de JK indissociável da cidade, por vezes até mesmo com contornos heroicos.

Figura 6. Croquis elaborados à mão por Lucio Costa para explicar a gênese do projeto do Plano Piloto de Brasília no concurso de 1957. O partido inicial do projeto era uma cruz, “gesto primário de quem assinala um lugar ou dele toma posse” (COSTA, 1960, p.52). A logomarca da Universidade de Brasília foi inspirada a partir do segundo desenho do urbanista, onde os eixos estão arqueados entre si.



Fonte: Costa, 1960, p.51.

Figura 7. Recortes de uma visão panorâmica da Praça dos Três Poderes. A partir do topo, da esquerda para a direita: Congresso Nacional e Museu da História de Brasília; Palácio do Planalto e Mastro da Bandeira; Panteão da Pátria e Pombal; Anexo II e sede do Supremo Tribunal Federal. Todos os projetos são de Oscar Niemeyer, com a exceção do Mastro da Bandeira, cuja autoria é de Sérgio Bernardes.

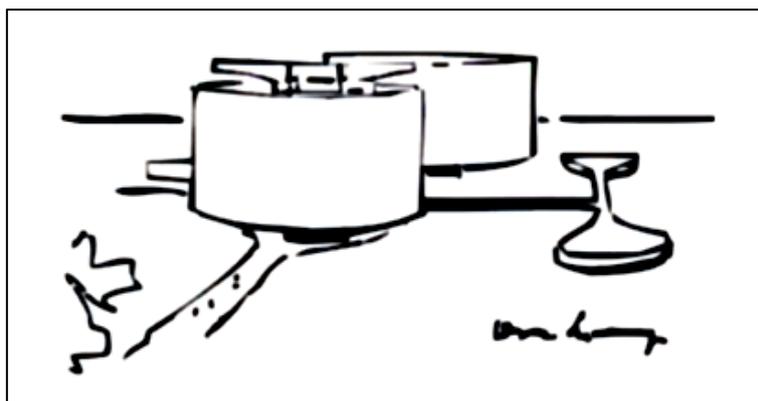


Fonte: fotografias do autor (2016).

Havia uma preferência de JK por Oscar Niemeyer como o principal arquiteto dos edifícios administrativos, razão pela qual os projetos que concorreram no concurso de 1957 deveriam contemplar apenas os aspectos urbanísticos da futura cidade. Lemos (1980, p.75) alega que essa predileção permitiu ao arquiteto mineiro uma liberdade sem precedentes: “em Brasília, Oscar Niemeyer se liberou de vez e fez o que quis, aproveitando a oportunidade única”. O próprio JK afirmou que “foi em Brasília [...] que Oscar Niemeyer apurou as linhas de sua Arquitetura, emprestando-lhes uma leveza que se aproxima do diáfano” (OLIVEIRA, 1976, p. 18). Niemeyer corroborava com a visão do presidente: em depoimento à época da construção da capital, o arquiteto acreditava que suas obras em Brasília se caracterizaram por uma “procura constante de concisão e pureza” (NIEMEYER, 1958, p. 3).

Assim, de forma nada acidental, o nome de Niemeyer acabou por se tornar quase um sinônimo das obras arquitetônicas brasilienses – até mesmo daquelas que não são de sua autoria. Após o período inicial de profusão dos seus projetos para a nova capital entre as décadas de 1950 e 1970, seguiu-se o que se pode relatar como “obras tardias” de Niemeyer em Brasília, a partir dos anos 1980. Entre estas, destaca-se um setor de edificações de grande porte para o poder judiciário, entre as quais se encontra o complexo arquitetônico da Procuradoria Geral da República, mostrada na figura 8.

Figura 8. Croqui de Oscar Niemeyer para o conjunto de prédios da Procuradoria Geral da República.



Fonte: <http://www.pgr.mpf.mp.br/conheca-o-mpf/visitacao-a-pgr/copy_of_sobre-o-redio/maquete.jpg>. Acesso: 02/12/2014.

A construção de uma sede para a PGR estava prevista já no plano urbanístico original de Brasília, mas sua construção só se iniciou em 1995, tendo sido completada em 2002. Desde a concepção inicial do partido arquitetônico por Niemeyer, foram

previstos dois prédios principais em formato cilíndrico (figura 8), projetados como cilindros de dimensões idênticas, mas com diferentes estruturas de sustentação.

Devido à proximidade entre os dois e o uso de películas refletoras em seus vidros, o conjunto se assemelha a uma associação de dois espelhos convexos cilíndricos. É possível observar a imagem de um prédio gerada por reflexão nos vidros do outro (figura 4) e até mesmo imagens formadas por reflexões adicionais (as quais aparecem mais escurecidas nas fotografias). Como relatamos na apresentação desse trabalho, detalhamos a formação dessas imagens, entre outros tópicos de interesse associados aos prédios desse complexo arquitetônico, em um artigo publicado anteriormente a essa tese (RIBEIRO, 2015c). Vale frisar ainda que o predominante tom azulado das edificações da PGR não é próprio da película refletora, sendo resultado da reflexão da luz azul espalhada na atmosfera.

Esse espetacular espelhamento dos edifícios, entretanto, exhibe um lado sombrio. Segundo Klem Jr. (2006), o espelhamento de fachadas é responsável por uma maior mortandade de pássaros - causada pelas inadvertidas colisões das aves contra as superfícies envidraçadas - do que qualquer outra atividade humana desenvolvida nas áreas urbanas. Os edifícios da PGR não são exceção a essa regra: em um estudo da Universidade de Brasília (UnB) desenvolvido por Marini e Camargo (2005), é apresentada uma estimativa da ocorrência de ao menos 464 colisões anuais, resultando em 114 mortes de pássaros. Até a data de publicação dessa tese, desconhecemos as ações que a PGR porventura tenha tomado para a minimização desse problema.

Diversas polêmicas envolveram o conjunto arquitetônico da PGR à época da sua construção, pois o mesmo apresenta características pós-modernistas que destoam do conjunto modernista original. O próprio Niemeyer (2000) admitiu que, embora os prédios fossem arquitetonicamente importantes, sua construção era dispendiosa. Outro tópico de polêmica era a interferência visual produzida à Praça dos Três Poderes, lugar dos prédios mais tradicionais de Brasília, como o Congresso Nacional e o Palácio do Planalto. Para Rossetti (2012), a própria configuração cilíndrica dos edifícios da PGR é controversa, pois causa uma expressão construtiva exagerada, devido ao exagero estrutural e ao uso impactante dos vidros reflexivos, uma solução atípica de Niemeyer, mais ligada à arquitetura pós-modernista.

Uma maquete da PGR foi elaborada por nós para a condução de atividades experimentais junto aos participantes da pesquisa. Nessa maquete, os prédios são representados por duas lixeiras cilíndricas cromadas (figura 9).

Figura 9. Maquete desenvolvida para a atividade experimental.



Fonte: fotografia do autor (2016).

Além da PGR, a proposta pedagógica envolveu a visita de campo a dois outros sítios arquitetônicos brasilienses: o Setor Bancário Sul, na área central de Brasília (figura 10), e o Palácio do Itamaraty (figura 11), na Esplanada dos Ministérios.

Figura 10. No primeiro plano, três edifícios de fachadas refletoras no Setor Bancário Sul, em Brasília, os quais se assemelham a grandes espelhos planos.



Fonte: fotografia do autor (2016).

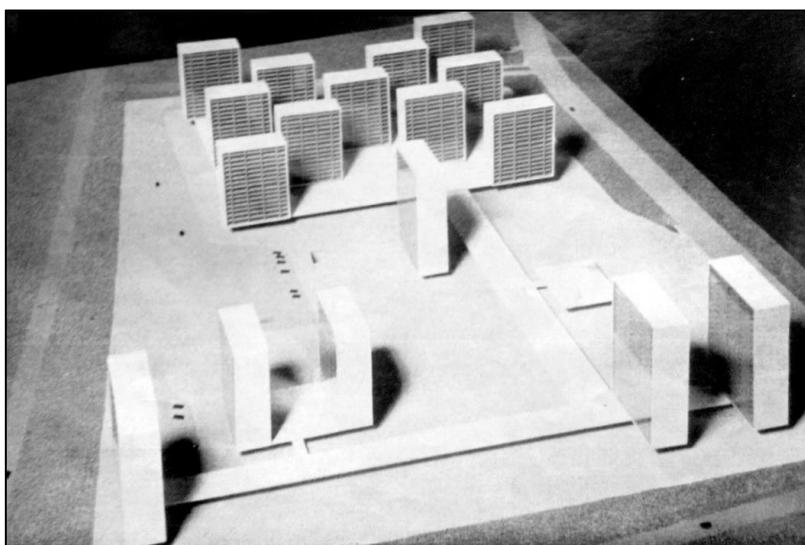
Figura 11. Palácio do Itamaraty à noite, com a escultura “Meteoro”, de Bruno Giorgi, em primeiro plano. A nitidez da imagem refletida nesse horário é maior devido à ausência de outras fontes luminosas.



Fonte: <<http://www.brasiliafacil.com/wp-content/uploads/palacio-do-itamaraty-noite.jpg>>. Acesso: 28/07/2016.

O Setor Bancário Sul começou a ser desenvolvido antes mesmo de a capital ser inaugurada, a partir de um projeto urbanístico de Niemeyer (1959), cuja maquete original é mostrada na figura 12. Os três prédios em destaque na figura 10 estão representados no topo dessa fotografia.

Figura 12. Maquete do projeto original do Setor Bancário Sul.



Fonte: Niemeyer, 1959.

Como a fotografia da maquete original permite inferir, o projeto previa, entre outros elementos, um conjunto de onze blocos de dimensões equivalentes entre si, cujos

andares térreos seriam nivelados e interligados por uma ampla marquise. Fotografias aéreas da região na atualidade, as quais podem ser consultadas no aplicativo *Google Maps*, demonstram grande verossimilhança com o projeto original.

Tais edifícios foram escolhidos por suas fachadas espelhadas serem frontais aos dois principais marcos arquitetônicos do Setor Bancário Sul, os edifícios-sede do Banco Central do Brasil (BCB) e da Caixa Econômica Federal (CEF). A sede do BCB, com 101 metros de altura, é notória por ser o prédio mais alto de Brasília. Há um amplo espaço aberto entre tais edifícios de referência e as superfícies espelhadas dos outros prédios citados. Esse posicionamento permite que imagens dos prédios do Banco Central e da Caixa Econômica sejam observadas por reflexão nas fachadas dos primeiros, dependendo da posição do observador (figura 13).

Figura 13. Esquerda: imagem do edifício do BCB refletida no prédio *Prime Business Convenience* e parte de imagem do prédio da CEF refletida no prédio do Fundo Nacional de Desenvolvimento da Educação (FNDE). Direita: um novo posicionamento do observador permite identificar uma imagem do prédio da CEF na mesma fachada do prédio *Prime Business Convenience*.



Fonte: fotografias do autor (2016).

Tínhamos também o desejo de trabalharmos com ao menos um espelho d'água durante a visita de campo. Tivemos grande liberdade de escolha para isso, pois mais de uma dezena das obras de Niemeyer na capital fazem uso de tal elemento paisagístico.

Escolhemos então o Palácio do Itamaraty, um dos principais cartões-postais da cidade e considerado por Escorel (2002, p.11) uma “obra-prima da arquitetura contemporânea”.

O Palácio do Itamaraty, também conhecido como Palácio dos Arcos, é marcante no espaço brasiliense. É sede do Ministério das Relações Exteriores (MRE) desde a sua inauguração. Seu nome foi herdado do seu antecessor, sede do mesmo órgão público na antiga capital do Rio de Janeiro, devido à tradicional identificação da diplomacia brasileira com o nome original.

A edificação foi construída no lado direito do Eixo Monumental, próximo à Praça dos Três Poderes, ao lado do Congresso Nacional. Esse posicionamento lhe garantiu um papel de destaque e contraste no conjunto arquitetônico brasiliense, apesar do próprio Niemeyer (2000, p.41) demonstrar certo grau de modéstia em relação ao seu projeto, considerando o prédio como um fruto de uma arquitetura simples - porém elegante – classificada pelo artista como “fácil de ser elaborada e aceita pela grande maioria”. A leitura da literatura acerca do edifício, entretanto, permite incluir o Palácio do Itamaraty entre os projetos mais significativos de Niemeyer, como exemplificado nos excertos a seguir:

A sede do Ministério das Relações Exteriores, o Palácio dos Arcos, pode ser considerada a melhor obra de Oscar Niemeyer. Composição de conjunto, equilíbrio dos volumes, natureza das superfícies, clareza dos espaços externos e internos, tudo corresponde às exigências do programa e alcança seus objetivos plásticos (CAMPOS, 1968, p.20).

Das tantas obras de caráter cívico de uma capital – palácios, templos, tribunais e ministérios – uma delas se destaca: o projeto para a sede do Ministério das Relações Exteriores – o Palácio Itamaraty. [...] O Palácio Itamaraty define uma correlação de valor e importância com os demais palácios e sua arquitetura apresenta uma autonomia formal, estrutural, plástica e simbólica contundente (ROSSETTI, 2012, p.59-60).

O espelho d’água que circunda o palácio, cujo paisagismo foi elaborado por Roberto Burle Marx com mais de oitenta espécies vegetais de diversos biomas brasileiros, é crucial para o seu efeito estético na paisagem da capital, em especial por permitir a duplicação simétrica da fachada (ver figura 11), como destaca Escorel (2002):

À noite, iluminados, os elegantes arcos da fachada se duplicam no lago circundante numa sinfonia de curvas inspiradas, como outras de Niemeyer, em lembranças do nosso país, das suas montanhas, das curvas sensuais da mulher bonita [...]. O palácio à noite parece uma

ilha de cristal a flutuar, feérica, em companhia da magnífica escultura de Bruno Giorgi, “Meteoro”, [...] uma das esculturas mais famosas da arte contemporânea e que foi saudada como símbolo visual de Brasília (ESCOREL, 2002, p.11-16).

Cabe ressaltar ainda que alguns aspectos típicos do urbanismo brasiliense, expressos nas cercanias dos sítios arquitetônicos citados, se revelaram facilitadores para a nossa proposta de trabalho. Na maioria das cidades brasileiras, o ordenamento urbano não foi traçado *a priori*, tendo sido resultado da vida social, política e econômica da cidade ao longo da sua história. Embora o mesmo se possa dizer de Brasília enquanto metrópole – o crescimento desorganizado foi uma regra das últimas três décadas – a organização urbana do Plano Piloto permaneceu mais fiel ao traçado original, com algumas inevitáveis modificações advindas da dinâmica do crescimento urbano. Assim, uma característica bastante marcante do Plano Piloto de Brasília é a presença de grandes espaços livres ou ainda não ocupados por edificações, com vias largas, parques generosos e amplas distâncias entre as construções dando a tônica do urbanismo da capital (GNECCO, 1995).

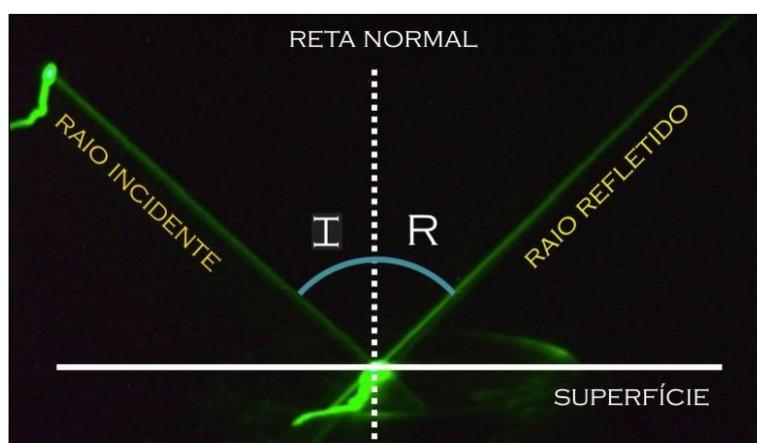
A nosso ver, a combinação entre as grandes distâncias e o destaque que as edificações assumem na paisagem torna o espaço urbano brasiliense ideal para o desenvolvimento de propostas de ensino de Óptica, tais como a descrita nesse trabalho. Por vezes, é possível enxergar em uma fachada refletora como os edifícios da PGR imagens refletidas de prédios muito distantes desta. O amplo espaço livre ao redor do complexo também facilita a movimentação do observador e permite diferentes pontos de vista, levando a uma multiplicidade de imagens observadas.

Antes de passarmos à revisão bibliográfica, cabe lembrar que as origens da pesquisa relatada nessa tese, além do relato de sala de aula presente na apresentação da mesma, também estão manifestas em um artigo prévio (RIBEIRO, 2015c), no qual apresentamos uma análise desse modelo experimental dos prédios da PGR. Os detalhes construtivos dessa maquete podem ser encontrados no Apêndice A.

4. REFLEXÃO LUMINOSA E ENSINO DE FÍSICA

A presente tese lida com a aprendizagem da reflexão luminosa, fenômeno que possui uma terminologia específica. Assim, para fins de formalização e melhor compreensão da revisão aqui apresentada, a figura 14 apresenta o fenômeno e os termos mais relevantes que aparecem nas abordagens sobre o tema. Na imagem, um feixe de luz *laser* incide sobre um espelho plano, refletindo na superfície do mesmo. O ângulo de incidência é representado por I e o ângulo de reflexão por R .

Figura 14. Reflexão de um *laser* em um espelho plano.



Fonte: fotografia e edição do autor (2009).

Isaac Newton (1730), no seu influente compêndio *Opticks: or, a treatise of the reflections, refractions, inflections and colours of light* (1730), não se preocupou em definir a reflexão, apresentando o mecanismo físico para a mesma apenas nas partes finais da obra, onde é apresentada a hipótese da existência de uma força à distância entre as partículas de matéria e luz, sendo tal força a responsável por todos os fenômenos ópticos ⁷. Na seção introdutória do livro, todavia, é dada uma breve definição acerca da reflexão e são apresentados seus axiomas. Em tradução nossa:

Definição: A reflexividade dos raios é sua disposição de retornarem ao mesmo meio a partir da superfície de separação com qualquer outro meio sobre a qual eles caiam. E os raios são mais ou menos refletidos, dependendo da maior ou menor facilidade com que retornam (NEWTON, 1730, p.3).

⁷ Deve-se frisar que esse mecanismo de ação à distância enunciado por Newton não está de acordo com as teorias contemporâneas sobre a natureza da luz.

Axioma 1: os ângulos de reflexão e refração estão contidos no mesmo plano do ângulo de incidência. Axioma 2: o ângulo de reflexão é igual ao ângulo de incidência (NEWTON, 1730, p. 5).

A influência das proposições de Newton é inegável, dado que seus axiomas ainda estão presentes em quase todos os livros didáticos de Ensino Médio, os quais se limitam a reescrever versões dos postulados newtonianos em seus capítulos dedicados à reflexão, após a apresentação de alguma definição breve acerca da reflexão. O segundo axioma newtoniano, em particular, é popularmente conhecido como a *Lei da Reflexão*.

Uma definição mais adequada sobre o fenômeno para o Ensino Médio, a nosso ver, deveria minimizar o uso de termos técnicos, trazer uma aproximação do entendimento cotidiano sobre a reflexão e explicitar a natureza submicroscópica do fenômeno, em um diálogo com o fenômeno macroscópico observado. Uma definição nesses moldes é fornecida por Hewitt (2002), em sua explanação conceitual sobre a natureza da luz:

A maior parte das coisas que vemos ao nosso redor não emite luz própria. Elas são visíveis porque reemitem a luz que incide em suas superfícies, vinda de uma fonte primária tal como o Sol ou uma lâmpada, ou de uma fonte secundária, tal como o céu iluminado. [...] Dizemos que a luz é *refletida* quando ela retorna ao meio de onde veio – o processo é chamado de **reflexão**. [...] Quando esta página é iluminada com a luz solar ou de um lampião, os elétrons dos átomos do papel e da tinta passam a oscilar mais energeticamente em resposta às oscilações dos campos elétricos da luz incidente. Os elétrons energizados, então, reemitem a luz que torna possível enxergar a página (HEWITT, 2002, p.469).

Diferentes autores, entretanto, realçam outras propriedades associadas à luz em suas definições para a reflexão. Como exemplos, citamos o caráter geométrico no tratamento da Óptica (DRUDE, 1959; SERWAY e VUILLE, 2011); a igualdade entre os ângulos de incidência e reflexão como um dado de natureza empírica (SERWAY e VUILLE, 2011; SERWAY e JEWETT, 2003; DRUDE 1959; NUSSENZVEIG, 1998); a possibilidade de verificação das leis da reflexão por vias teóricas, como o princípio de Fermat ou as equações de Maxwell (SERWAY e JEWETT, 2003; HEWITT, 2002; BASS *et al.*, 1995); a reflexão e a refração como fenômenos associados (SERWAY e VUILLE, 2011; DRUDE, 1959; HETCH, 2002; BASS *et al.*, 1995); e o caráter ondulatório da luz durante a reflexão (HALLIDAY *et al.*, 2011; TIPLER e MOSCA, 2008; HETCH, 2002).

A ausência dos elementos supracitados (entre outros) colabora para a uniformidade flagrante nas definições encontradas nos livros de Ensino Médio ⁸. Ribeiro e Carneiro (2016b) identificaram que apenas três atributos de conceito de inspiração claramente newtoniana são usualmente associados à reflexão: 1) o retorno para o meio de origem como cerne da definição; 2) a coplanaridade entre o raio incidente, o raio refletido e a reta normal à superfície (*Primeira lei da reflexão*); e 3) a igualdade entre os ângulos de incidência e reflexão, confirmada por via teórica ou experimental (*Segunda lei da reflexão*).

Após esse preâmbulo, cabe explicar como a revisão bibliográfica está apresentada nesse capítulo. Na primeira parte, buscamos fazer emergir da literatura algumas relações entre o ensino de Física e a Arquitetura. Para tal, a consulta a periódicos não se revelou suficiente, razão pela qual também foram revisados alguns livros onde tal interação é expressa. Na segunda parte, foi feita uma revisão em moldes mais tradicionais, a partir da leitura de periódicos de ensino de Física, buscando identificar como o fenômeno da reflexão luminosa tem sido tratado pelos pesquisadores da área. Frisa-se que, embora nossa pesquisa tenha sido desenvolvida a partir de uma atividade que lidava com espelhos convexos cilíndricos, optamos por revisar artigos voltados para o tema da reflexão luminosa como um todo, e não apenas os trabalhos que lidavam com tal subconjunto de fenômenos.

4.1. Relações entre Arquitetura e Ensino de Física

Em periódicos voltados de forma específica para o Ensino de Ciências, é rara a discussão das relações entre a Arquitetura e Física, assim como do entrelaçamento dessas disciplinas com a prática pedagógica, tanto individualmente (ou seja, textos que entrelaçam a Física e Arquitetura) como em conjunto (interação entre as três disciplinas). Os poucos livros e artigos acadêmicos dedicados a esse entrelaçamento se preocupam em ser um acompanhamento didático para alunos de Arquitetura cursando disciplinas universitárias de Física (*e.g.* ACIOLI, 1994; SALU, 2013) ou relatos descritivos de tais cursos (SALAMO *et al.*, 1979; ANASTASSAKIS, 1982; DONOSO *et al.*, 2005). Assim, tornou-se inevitável a diversificação de nossas fontes de consulta

⁸ Obras didáticas consultadas: Alvarenga e Máximo, 2005; Anjos, 2005; Bonjorno *et al.*, 2010; Ferraro e Toledo, 2003; Fuke e Yamamoto, 2010; Guimarães e Fonte Boa, 2005; Guimarães *et al.*, 2013. Kantor *et al.*, 2010; Pietrocola *et al.*, 2011; Ramalho *et al.*, 2007; Ueno, 2005; Villas-Bôas *et al.*, 2011; Xavier e Barreto, 2008.

para a primeira parte dessa revisão bibliográfica, acessando também periódicos dedicados às relações entre a Arquitetura e o meio ambiente.

A leitura dos textos descritores dos cursos de Física voltados para arquitetos em formação permite inferir que tais cursos tendem a valorizar temas da mecânica, transmissão de calor e acústica, devido às características funcionais tradicionais em projetos arquitetônicos, merecendo a Óptica pouco ou nenhum destaque, conferindo um caráter de inovação da nossa proposta. Se nos prendermos ao estudo da reflexão da luz, tema desse trabalho, a ausência apontada é ainda mais notória.

Esse é o caso da obra de Acioli (1994), na qual a mecânica newtoniana e as condições de equilíbrio de um corpo são discutidas com grande detalhe, enquanto alguns temas pontuais da Óptica Física, como a polarização e os filtros coloridos, são apresentados de forma breve, mas nenhuma menção à reflexão luminosa é feita. A obra de Dib (1972), por sua vez, só se dedica a apresentar problemas didáticos de mecânica, enquanto o conteúdo programático apresentado no livro de Lauricella *et al.* (1992) cobre os temas supracitados, dando também destaque a temas da eletricidade, e dedicando um único capítulo à fotometria. Novamente, a obra não se preocupa com o estudo da reflexão luminosa em fachadas envidraçadas ou outras superfícies.

Bartlett (1981) defende a presença de uma “conexão próxima e reconhecível” entre a Física básica e os fenômenos cotidianos na formação dos arquitetos, citando como exemplo o tema da ressonância, a fim de que a segurança de pontes e passarelas seja uma preocupação desses profissionais. Anastassakis (1982) também defende a presença de temas funcionais na formação arquitetônica (equilíbrio, fluidos, vibrações, calor, energia, circuitos elétricos, luz), mas que devem ser acompanhados de temas indiretos (ruído, cores, holografia, fotoelasticidade, propriedades físicas dos materiais) e também dos grandes problemas e desenvolvimentos da Física atual (Cosmologia, Física Quântica, Nanotecnologia).

Brown *et al.* (1982) descrevem uma proposta diferenciada de currículo de Física para um curso de Arquitetura, valorizando tópicos como vibrações (terremotos são simulados com maquetes) e balanço energético das edificações, e propondo que tópicos “esotéricos” como as leis teóricas do eletromagnetismo estejam ausentes, mas não chegam a mencionar o estudo de aplicações da Óptica Geométrica. Salamo *et al.* (1978, p.24) também escrutinizam o curso conduzido em sua instituição, e embora cheguem a afirmar que “todo estudante de Arquitetura tem uma forte apreciação pelo conhecimento

do [...] comportamento óptico das estruturas”, as menções à Óptica são decepcionantes, limitadas à medição da intensidade luminosa com fotômetros.

Anastakassis (1982) também cita a Óptica como um dos temas voltados para a funcionalidade das estruturas arquitetônicas, mas a repetida ausência de detalhamento do tratamento desse conteúdo demonstra que o mesmo apresenta pouca relevância na literatura consultada. Por outro lado, há grande preocupação quanto a projetos de iluminação de ambientes interiores e balanço energético de uma edificação, sobretudo em climas quentes (BOYER *et al.*, 2012; SÖZEN e GEDÍK, 2007; MANIOĞLU e YILMAZ, 2008; OKTAY, 2002). Ou seja, embora a iluminação seja levada em conta no projeto *interior* da estrutura, são desconsiderados os efeitos no *exterior* à mesma, por exemplo, oriundos da reflexão da luz e do calor nos vidros que a recobrem.

A única exceção evidenciada por nossas leituras sobre as relações entre Arquitetura e Óptica foi o trabalho de Vollmer e Möllmann (2012). Ainda assim, ressalta-se que a mesma não demonstra aspirações pedagógicas, sendo, ao contrário, um relato de intenso teor técnico e publicado em um periódico voltado para a Física geral (*European Journal of Physics*), o qual não se dedica de forma específica ao Ensino de Ciências. Os autores partiram de casos reais de prédios com formato côncavo (Figura 2) e recobertos com vidros refletivos, os quais produzem zonas aquecidas em seus arredores. No artigo citado, os autores propõem dois métodos para o estudo de tais zonas de concentração de radiação: a construção de um modelo em escala reduzida de um edifício de Las Vegas (figura 15) que apresentava o problema e a simulação por meio de programas computacionais de renderização de modelos tridimensionais. Vale ressaltar que o prédio em questão também foi delineado pelo arquiteto Rafael Viñoly, o qual projetou o *Fryscrapers* londrino, prédio que nos forneceu o *insight* inicial desse trabalho.

Confessamos que nos sentimos frustrados – e ao mesmo tempo estimulados – após essa primeira etapa da revisão, na medida em que a mesma evidenciou uma carência por trabalhos que fizessem emergir as relações entre a Óptica e a Arquitetura, principalmente em um contexto pedagógico. O contraponto entre frustração e estímulo advém dessa relativa ausência de trabalhos: se há carência por suportes, pode caber à nossa pesquisa estimular a construção dos mesmos.

Ao mesmo tempo, devemos ressaltar que nos foi indicada uma hipótese que talvez possa explicar a relativa ausência de trabalhos correlacionando a Óptica e a

Arquitetura. Quando dois temas não possuem uma afinidade direta ou imediata, a probabilidade de inter-relação entre os dois é naturalmente diminuída.

Figura 15. Hotel Vdara, em Las Vegas, com uma ampla fachada côncava espelhada. Projeto de Rafael Viñoly, inaugurado em 2009.



Fonte: <<http://www.destination360.com/north-america/us/nevada/las-vegas/images/s/vdara.jpg>>. Acesso: 15/01/2018.

4.2. A reflexão luminosa nos periódicos de Ensino de Física

Ao contrário da relativa escassez de trabalhos presentes na primeira parte dessa revisão, já concebíamos de antemão que seria extenso o número de trabalhos a serem incluídos nessa segunda parte, acerca do tratamento da reflexão luminosa em periódicos nacionais e estrangeiros voltados ao Ensino de Física, dada a efervescência na pesquisa nessa área a nas últimas décadas e a crescente disponibilidade de periódicos em formato eletrônico. Para os fins dessa revisão, optamos por priorizar artigos dedicados ao tema da reflexão luminosa presentes em revistas acadêmicas que sejam voltadas de forma predominante para o Ensino de Física, não tendo sido revisados aqueles periódicos voltados para o Ensino de Ciências em geral ⁹.

A presente revisão foi conduzida para artigos publicados entre 1995 e 2018, com vistas a fornecer um panorama detalhado do estado da arte das pesquisas sobre o tema. Ressalta-se que artigos dedicados à reflexão interna total não foram incluídos, pois esse fenômeno tem relação direta com a refração da luz e não com a reflexão *per se*. Estudos

⁹ Cabe alertar, para dirimir eventuais dúvidas sobre plágio, que uma versão ampliada dessa segunda parte da revisão já foi publicada no Caderno Brasileiro de Ensino de Física (RIBEIRO e CARNEIRO, 2016a).

sobre radiômetros também não estão presentes, pois o funcionamento desses aparelhos se vincula às leis da termodinâmica e não à reflexão luminosa. Já artigos sobre holografia só foram incluídos caso apresentassem correlação direta com o fenômeno da reflexão, e não a mera citação do espelho em seus aparatos. Interferômetros também utilizam espelhos em sua constituição, mas não encontramos nenhum artigo que se dedicasse à reflexão luminosa com tais aparelhos, razão pela qual tais trabalhos também estão ausentes. Artigos acerca de telescópios refletores também estão ausentes, assim como trabalhos que versam sobre a medição da velocidade da luz, sobre a relação entre polarização e reflexão e sobre espelhos relativísticos, por não apresentarem correlação direta com a proposta pedagógica que serviu como base para essa pesquisa.

A partir da lista de periódicos disponíveis no portal *Qualis*, foram selecionados periódicos classificados nas áreas de Educação ou Ensino em todos os extratos (A1, A2, B1, B2, B3 e C) no quadriênio 2013-2016. Os periódicos selecionados ou eram voltados ou de forma exclusiva para o Ensino de Física ou eram dedicados às temáticas gerais da Física¹⁰, mas com seções específicas sobre o ensino dessa disciplina. Esse recorte foi acrescido de alguns periódicos específicos do Ensino de Física que não possuíam classificação *Qualis*¹¹, mas cujo escopo fosse similar às demais publicações. Optamos também por incluir na revisão dois periódicos da Universidade de Brasília, *Physicae Organum* e *Revista do Professor de Física*, cuja publicação se iniciou em anos recentes.

Para construir a lista de revistas a serem revisadas, usamos um método misto de busca. Inicialmente, utilizamos o portal *Qualis* para produzir uma lista com todas as revistas voltadas para Educação e/ou Ensino com a classificação requerida. A partir dessa lista, procuramos nos títulos dos periódicos a palavra *física* (ou suas traduções *physics*, *physique*, *física*). Para uma maior abrangência na revisão, optamos por uma

¹⁰ Algumas revistas no segmento *Qualis* B3 não foram revisadas, pois não possuem o escopo generalista buscado, sendo dedicadas a temas específicos da física (matéria condensada, estado sólido, entre outros). Não consideramos que estas temáticas estejam correlacionadas de forma direta com as aplicações da reflexão no Ensino de Ciências que pretendemos investigar nesse trabalho. Ademais, os periódicos não revelaram nenhuma seção específica dedicada ao ensino da disciplina. Assim, não foram incluídos na revisão os periódicos *International Journal of Modern Physics*, *Physica. B Condensed Matter*, *Physica. E Low-Dimensional Systems and Nanostructures* e *Physica Status Solidi B, Basic Research*.

¹¹ *Qualis* é um sistema brasileiro de avaliação de periódicos, mantido pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

combinação de periódicos de onze nacionalidades, incluindo publicações em quatro idiomas (inglês, espanhol, francês e português) ¹².

Durante a seleção dos artigos, o portal eletrônico de cada periódico foi consultado de forma individual. No mecanismo interno de busca de cada revista, foi inserido o termo *reflexão* (ou suas traduções: *reflection*, *reflexión*, *réflexion*). O termo buscado poderia estar presente no título, resumo ou texto completo, para minimizar as chances de exclusão não intencional de artigos. Alguns periódicos não permitiam tal busca, ou apresentavam um número muito pequeno de resultados; nessas situações, a consulta a cada edição da revista teve que ser feita diretamente, sendo os artigos então selecionados a partir de seus resumos.

Em cada portal, a lista de trabalhos resultante foi filtrada por nós de forma “manual”: a partir da leitura do título e do resumo do trabalho, buscamos identificar se a sua temática estava vinculada ao fenômeno luminoso, pois a palavra *reflexão* tem significados múltiplos e, portanto, transparece em diversos contextos. As ferramentas de busca dos periódicos *American Journal of Physics*, *European Journal of Physics*, *Physics Education* e *The Physics Teacher* permitiram a filtragem por área de estudo (Óptica), facilitando a seleção dos artigos. Nos outros periódicos revisados, entretanto, tal característica não estava presente, exigindo um maior esforço para a seleção dos trabalhos adequados.

Assim, os procedimentos nessa segunda parte da revisão tiveram como tônica uma adaptação às condições de busca de cada periódico, a fim de minimizar as chances de artigos dedicados ao tema não serem incluídos. Admitimos que tal possibilidade de ausência de trabalhos exista, mesmo com todos os esforços citados. Contudo, podemos nos apoiar no artigo de Braga (1973) sobre as *frentes de pesquisa*, as quais devem ser entendidas como o conjunto de artigos mais relevantes em uma área temática. Segundo a autora, uma frente de pesquisa tende a apresentar coincidência com os documentos

¹² Periódicos revisados: *American Journal of Physics* (A1), EUA; *Caderno Brasileiro de Ensino de Física* (A2), Brasil; *Caderno de Física da UEFS* (B3), Brasil; *European Journal of Physics* (A1), Reino Unido; *European Journal of Physics Education* (sem classificação *Qualis*), Turquia; *Física na Escola* (B2), Brasil; *Gazeta de Física* (sem classificação *Qualis*), Portugal; *Latin-American Journal of Physics Education* (B1), México; *Physics Education* (A2), Reino Unido; *Physicae Organum* (C), Brasil; *Physical Review Physics Education Research* (sem classificação *Qualis*), EUA; *Reflets de la Physique* (sem classificação *Qualis*), França; *Revista Brasileira de Ensino de Física* (A1), Brasil; *Revista Cubana de Física* (C), Cuba; *Revista do Professor de Física* (sem classificação *Qualis*), Brasil; *Revista Española de Física* (sem classificação *Qualis*), Espanha; *Revista de Enseñanza de la Física* (B1), Argentina; *The Physics Teacher* (B1), EUA; *Unnes Physics Education Journal* (sem classificação *Qualis*), Indonésia.

citados nas revisões de literatura sobre o tema, o que ajuda a minimizar as consequências de eventuais ausências no capítulo presente.

A reflexão da luz é um tema de grande abrangência, incorporando discussões que variam desde princípios físicos fundamentais até temas de alta tecnologia. Assim, decidimos pela categorização dos artigos a partir dos tópicos nos quais a discussão da reflexão é comumente dividida em livros didáticos de ensino superior e médio. Foram criadas então seis categorias de classificação: princípios da reflexão, reflexão difusa, imagens reais e virtuais, espelhos planos, espelhos curvos e associações de espelhos.

Após a separação dos artigos nas categorias que consideramos mais adequadas, percebemos uma grande concentração de trabalhos na classificação de espelhos curvos. Esta centralização não nos surpreendeu, pois esse tópico permite uma maior variedade de abordagens, fato identificado em uma revisão anterior (RIBEIRO e VERDEAUX, 2012a) e também percebido no maior espaço que os livros didáticos lhe dedicam.

Após a seleção prévia dos artigos, fomos alertados na etapa de qualificação dessa tese que a revisão estava por demais extensa e desconexa. Concordamos com tal alerta, razão pela qual decidimos por um novo recorte: na medida em que nossa pesquisa se deu no âmbito do Ensino Médio e as maquetes construídas para a mesma se baseavam em materiais cotidianos, não nos pareceu necessário incluir artigos que lidassem com o tratamento da reflexão luminosa com grande complexidade algébrica ou alta tecnologia. Decidimos também não referenciar artigos que se dedicassem de forma mais específica à história da Óptica (pois a tese não lida com tal temática) ou que fossem revisões bibliográficas acerca de temas da Óptica. Acreditamos que tal recorte permitiu estabelecer um maior foco aos trabalhos que poderiam efetivamente suportar as hipóteses e métodos da pesquisa aqui relatada.

4.2.1. Princípios da reflexão

Nessa categoria, incluímos os artigos que se dedicam às leis fundamentais da reflexão, tais como o princípio da igualdade entre os ângulos, o fato dos raios refletidos e incidentes serem coplanares à reta normal, o princípio do caminho mínimo de Fermat e a refletância dos materiais.

Tais princípios são eficazes na explicação da reflexão e da refração, mas não são aplicáveis à difração e à interferência, as quais exigem teorias estudadas na Óptica Física. A proposta de Sharma (2003) busca uma unidade entre essas duas disciplinas, a

partir de uma extensão do estudo da interferência em múltiplas fendas. Para o autor, contanto que o espaço entre as linhas seja menor que metade do comprimento de onda da luz incidente, a reflexão e a refração são contempladas pelas mesmas teorias que os outros fenômenos ópticos. Prytz (2016) vai além e demonstra que a lei da reflexão pode ser derivada a partir de associação entre o princípio de Huygens para a propagação ondulatória e o modelo molecular da água como um dipolo elétrico.

Embora o princípio da igualdade dos ângulos de incidência e reflexão seja válido para qualquer geometria, ele pode se revelar complexo para espelhos curvos. Assim, é comum que este princípio seja substituído pela consideração de raios paraxiais (próximos ao eixo principal do espelho), conhecida como uma das condições de aproximação de Gauss. Şengören e Çoban (2011) se dedicam a essa condição, apresentando uma atividade experimental simples, usando um *laser* e uma superfície côncava cilíndrica, para a verificação da posição do foco dos raios paraxiais e da obtenção de múltiplas imagens quando essa condição de aproximação não é verificada.

Dois artigos se dedicam ao princípio de Fermat, aplicado não apenas à reflexão, mas também à refração. Em sua forma clássica, a qual não cobre todos os casos possíveis, esse princípio conjectura que a luz se propaga de um ponto a outro no mínimo tempo possível. A partir dessa afirmação, é possível justificar a necessidade da igualdade entre os ângulos de incidência e reflexão em superfícies planas. Paleiov *et al.* (2011) demonstram o princípio de Fermat com uma atividade experimental bastante simples, usando um espelho de curvatura arbitrária e fazendo a medição direta dos possíveis caminhos que a luz pode tomar para ir de um ponto a outro após a reflexão no espelho. Os autores apresentam a limitação desse princípio na sua forma clássica, pois na demonstração experimental presente no artigo, a luz toma caminhos que têm máxima ou mínima extensão. Martins e Silva (2013) ressaltam essa limitação, pois o princípio do tempo mínimo só é válido para espelhos curvos convexos.

Uma preocupação comum a alguns autores é a apresentação de estratégias diferenciadas dos princípios da reflexão e da Óptica Geométrica em geral. Even *et al.* (2016), por exemplo, relata a forma pela qual a estrutura da aprendizagem tradicional foi invertida no curso sobre o tema: ao invés das atividades experimentais serem uma verificação das leis previamente ensinadas, a “aprendizagem ativa” é estimulada ao propiciar que os estudantes desenvolvam suas próprias atividades experimentais. Já Kaewkhong e Chitaree (2017) apresentam uma aparelhagem de baixo custo e alta precisão para localizar a imagem formada por um espelho plano, associado ao método

tradicional de se utilizar diagramas de raios com base no princípio da reflexão para se encontrar a posição dessa imagem.

A experimentação é, provavelmente, a estratégia mais recorrente para buscar a superação das dificuldades de aprendizagem dos princípios da Óptica Geométrica. Silva (2004), por exemplo, apresenta um projeto para a construção de um banco óptico composto de materiais de baixo custo, que pode ser utilizado em aulas experimentais de reflexão e refração no Ensino Médio. A proposta de Camargo *et al.* (2008) também envolve a construção de artefatos concretos, mas para a exposição dos princípios ópticos para alunos com deficiência visual, razão pela qual os artefatos são tátil-visuais. Robinett *et al.* (1998) também apresentam uma atividade experimental, com grande potencial lúdico, no qual múltiplas reflexões de um feixe *laser* são obtidas, em uma analogia mecânica com uma hipotética mesa de bilhar circular. Por sua vez, Rode e Friege (2017) se dedicam à criação de nove atividades experimentais em estilo “caixa preta” (tipo de tarefa experimental em que a estrutura interna é não visível para o experimentador) usando espelhos, divisores de feixes de luz e bloqueadores. Os alunos são então instruídos a variar a entrada do feixe de luz e observar sua saída, a fim de ter uma ideia da possível estrutura interna da caixa preta.

O problema conceitual discutido por Rojas (2013) diverge da experimentação. O autor se dedica a explicar a multiplicidade de convenções de sinais usadas na Óptica de espelhos e lentes, pois pelo menos quatro convenções diferentes são usadas nos livros didáticos, fato que traz dificuldades à aprendizagem, segundo o autor.

Nenhum material conhecido reflete a luz em sua totalidade, pois parcelas dessa radiação são absorvidas ou transmitidas pela substância. Assim, a *refletância* de um material ou superfície pode ser entendida como a razão entre a intensidade da radiação refletida e a intensidade da radiação incidente. Essa grandeza é dependente do comprimento de onda da luz e do ângulo de incidência, conforme Boulomytis *et al.* (2011) explicitam. Ainda sobre esse tema, Roeder (2012) demonstra como o uso de espelhos refletores comuns, cuja refletância pode ser entendida como constante e independente do comprimento de onda incidente, aumenta a taxa de iluminação de uma lâmpada. Já Vieira (2014) propõe um aparato experimental simples (do ponto de vista do autor) para medir a dependência da refletância com o ângulo de incidência da radiação.

4.2.2. Reflexão difusa

O estudo dos espelhos de diversas geometrias é quase um sinônimo da abordagem que os livros didáticos desenvolvem nos capítulos voltados à reflexão luminosa. Menor destaque merece o fenômeno da reflexão difusa, talvez pelas dificuldades em analisar esse tema de forma quantitativa.

A reflexão é dita especular quando ocorre em superfícies lisas, tais como espelhos, e difusa em superfícies irregulares. As irregularidades terminam por espalhar a luz incidente em diversas direções, permitindo que o observador veja a própria superfície e não uma imagem da fonte luminosa. Nesse aspecto, a reflexão difusa é muito mais comum que a especular: quando olhamos para a maioria dos objetos cotidianos, estamos captando a luz difundida por suas superfícies. Zetie (2017) parte dessa dicotomia para discutir as razões que levam uma superfície lisa e polida (como um espelho) a produzirem uma imagem, enquanto superfícies irregulares (como uma folha de papel) não a produzem.

A separação entre reflexão especular e difusa, evidenciada nos textos de obras didáticas, é posta em xeque por Fakhruddin (2007). O autor demonstra por via experimental que superfícies irregulares podem vir a produzir as imagens virtuais típicas de uma reflexão especular, contanto que o ângulo de incidência seja grande, ou seja, os raios sejam praticamente paralelos à superfície. A percepção qualitativa inicial desse autor veio, quase uma década depois, a passar por um grande detalhamento, tanto em termos quantitativos quanto experimentais, no trabalho de Yasuda *et al.* (2016).

Vale opinarmos aqui que concordamos com Fakhruddin (2007) e Yasuda *et al.* (2016) em considerar a reflexão especular como um caso particular da reflexão difusa. A nosso ver, essa separação em dois “tipos” de reflexão pode induzir a um clássico erro conceitual, no qual os estudantes entendem a difusão da luz refletida como uma violação da segunda lei da reflexão.

A reflexão difusa não é produzida apenas por irregularidades na superfície do material. Berry e Klein (1997) apresentam uma interessante aplicação desse fenômeno, conseguida quando são empilhadas diversas lâminas plásticas de espessuras variadas, tais como as antigas transparências de retroprojetores. Os autores demonstram que quase toda a luz incidente é difundida por reflexão, devido à acumulação das reflexões nas várias interfaces entre as lâminas, entre as quais uma fina camada de ar é acumulada.

Um erro conceitual comum por parte dos estudantes, de acordo com nossa prática didática, é associar a difusão da luz a uma violação do princípio da igualdade dos ângulos de incidência e reflexão. Esse princípio é obedecido em qualquer reflexão, mas a irregularidade da superfície faz com que os ângulos de incidência sejam diferentes em cada ponto, mesmo para os raios solares (supostos paralelos). Essa preocupação transparece no artigo de Allocco (1999), dedicado a um exemplo prosaico desse fenômeno: a reflexão difusa da luz em uma poça de água agitada pela chuva, tornando impossível observar a imagem refletida do céu. O fenômeno pode parecer banal, mas Molesini e Vannoni (2008) discordam. Os autores analisam a situação em detalhe, usando um modelo simplificado e simétrico das ondas formadas na superfície da água quando gotas de água incidem sobre a mesma, e mostram evidências de padrões de distorção na luz difundida pela superfície. Os mesmos autores (MOLESINI e VANNONI, 2009) expandem a discussão em um artigo posterior, levando em conta configurações assimétricas, a fim de determinar uma solução mais geral para os padrões de reflexão observados.

Apesar de alguns dos artigos supracitados terem vertentes teóricas, percebe-se da leitura dos artigos que a análise qualitativa de situações cotidianas é a principal linha de condução dos artigos incluídos nesse item. Zanardi e Muramatsu (2011), por exemplo, explicam as manchas esbranquiçadas na superfície do café como um resultado da reflexão difusa das múltiplas frequências que compõem a luz branca. Mohammadpour (2008) usa a face impressa de um *compact disc* (CD) para demonstrar a difusão: após refletir a luz de uma lanterna nessa face, as áreas prateadas da superfície são projetadas em um anteparo como claras, enquanto as áreas impressas aparecem escuras, pois a luz refletida nessas áreas foi espalhada em direções diversas. Já Tantillo (2008) apresenta uma discussão sobre uma ilusão de óptica, relacionada à difusão da luz, produzida quando dois blocos de parafina são separados por papel alumínio. A nosso ver, essa última atividade tem forte potencial didático, pela sua simplicidade e efeito lúdico.

Por vezes, o caráter lúdico das propostas transparece até mesmo no título dos artigos: o título do artigo de Grossman (2014) nos leva a acreditar que o autor está estudando como vampiros produzem suas *selfies*! A leitura do texto, entretanto, mostra a seriedade do tema, pois a imagem de uma pessoa pode se revelar ausente quando produzida por metais escovados, como aqueles usados em revestimentos de paredes em elevadores. A difusão da luz nessas superfícies leva ao “desaparecimento” da imagem do observador, daí a alusão à *selfie* vampírica.

4.2.3. Imagens reais e virtuais

A reflexão especular, em última instância, permite a conjugação de imagens. Há dois tipos de imagens em Óptica Geométrica: *reais* (resultantes da convergência de raios de luz emergentes de um espelho ou outro sistema óptico) e *virtuais* (resultantes da divergência dos raios nesse sistema). A imagem que uma pessoa observa de si própria em um espelho plano é virtual, enquanto um espelho côncavo pode ser usado para projetar uma imagem real e invertida de uma vela em uma parede.

Um subgrupo dos artigos revisados se dedica de forma prioritária à análise de como essas imagens são produzidas e quais as características das mesmas, usando diferentes tipos de espelhos. O trabalho de Küçüközer (2011) busca evidenciar as diferenças entre os dois tipos de imagem. Segundo o autor, os estudantes acreditam que uma imagem real só pode ser vista se for projetada em uma tela, fato que não é verdadeiro, mas que leva a erros conceituais graves, como a crença de todas as imagens vistas diretamente terem caráter virtual.

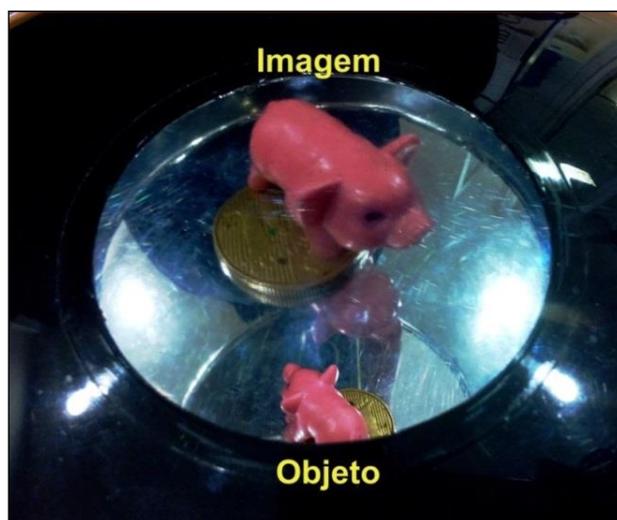
Essa crença errônea, infelizmente, pode ter sua origem nas próprias atividades experimentais desenvolvidas pelos professores em sala de aula, como o sugerido por Graham (2006), que usa um trilho óptico simplificado e um espelho côncavo, para projetar a imagem real de uma lâmpada abaixo da mesma. Sem uma explicação adicional sobre a possibilidade de a imagem ser vista sem a projeção, o estudante pode associar os dois fenômenos de forma indelével. Balta e Eryilmaz (2011) também se dedicam a explicar a diferença entre imagens reais e virtuais, a partir da prosaica imagem invertida que se pode observar na superfície côncava de uma colher. Os autores relatam ter encontrado na internet diversas explicações errôneas para o fenômeno, razão que os motivou a desenvolver a explicação correta.

Também na linha de explicações errôneas sobre o cotidiano, Ribeiro (2015a) utiliza um trecho de uma história em quadrinhos de Maurício de Sousa sobre um espelho plano, a partir do qual se percebe que parcela significativa dos estudantes acredita em hipóteses errôneas, crendo que um espelho deva ser maior que o objeto para a observação completa de uma imagem virtual e que a imagem se forma na superfície do espelho e não atrás do mesmo. Inspirada pelo quadrinho, uma atividade experimental demonstrativa foi desenvolvida para demonstrar a falsidade dessas hipóteses.

Como discutido por Küçüközer (2011), as imagens reais podem ser observadas sem a necessidade de projeção. O uso de um equipamento comercial composto de dois

espelhos côncavos, o *mirascópio*, já é tradicional como atividade experimental demonstrativa para a visualização de uma imagem real tridimensional de um pequeno objeto (figura 16).

Figura 16. Imagem real formada em um mirascópio.



Fonte: fotografia do autor (2015).

Diversos autores se dedicam às possibilidades pedagógicas desse sistema óptico, constituído por dois espelhos parabólicos dispostos frente a frente. Featonby (2007), por exemplo, ressalta que esta imagem pode se tornar ainda mais “real” se a luz emitida por uma lanterna ou apontador *laser* for direcionada para a posição de formação dessa imagem, enquanto Yurumezoglu (2017), por sua vez, propõe o uso do fotômetro disponível em celulares para interpretar o que seria “sentir” ou “tocar” a imagem real no mirascópio.

Rodríguez e Alberú (2017) sugerem também atividades didáticas a partir da imagem real produzida por um mirascópio, enquanto Riveros e Rosenberger (2012) chamam essa imagem de um “truque mágico” em seu artigo, em consonância com a sensação que os alunos têm ao observar tal imagem. Já Silva e Laburú (2015) apresentam uma alternativa de baixo custo ao equipamento disponível comercialmente, feita com uma simples lâmpada incandescente. Esses autores abordam ainda a montagem simplificada de forma quantitativa, a partir da geração de dados numéricos experimentais, ao contrário dos textos anteriores, no qual o aparato é trabalhado somente por vias conceituais e geométricas.

Daffron e Greenslade Jr. (2015) utilizam as imagens virtuais para a detecção de padrões complexos de vibração em um *caleidofone* (aparelho capaz de gerar uma

multiplicidade aleatória de sons, assim como o caleidoscópio cria uma diversidade de imagens). Os autores destacam, entretanto, que o caráter virtual obriga o observador a se dispor em uma posição adequada para enxergar o padrão de vibração, fato que não aconteceria caso a imagem gerada fosse real e estivesse projetada em um anteparo. Já Mayer e Varaksina (2014) defendem que os alunos compreendem de forma mais exata a ação dos espelhos ópticos se as ondas formadas durante a reflexão puderem ser observadas. Para isso, fazem uso de uma analogia dentre a propagação de ondas em finas placas elásticas (as quais podem ser observadas) com as ondas luminosas (as quais são invisíveis¹³).

Analogias também estão presentes no trabalho de Moore *et al.* (2011), no qual o conceito de imagens virtuais é explorado a partir do movimento de bolas em uma mesa de bilhar, o qual é comparado pelos autores com os tradicionais diagramas de raios de luz na Óptica Geométrica, usados para a construção geométrica de imagens em espelhos. Maiztegui *et al.* (1998) defendem que a abordagem tradicional da Óptica Geométrica no Ensino Médio supervaloriza tais construções, relegando a prática experimental a segundo plano, daí a apresentação de uma proposta experimental simples no artigo para complementar o processo tradicional de construção geométrica.

O artigo de Santana *et al.* (2012) também se dedica a esses diagramas, ressaltando seu potencial para entendimento e caracterização das propriedades dos sistemas ópticos, mas ressalvam as dificuldades conceituais que os estudantes apresentam ao lidar com esses processos construtivos. Para os autores, essas dificuldades se originam na representação da propagação das ondas luminosas por raios de luz, as quais podem ser minimizadas com o uso de simulações computacionais, baseadas no sistema *GeoGebra*¹⁴, posição compartilhada por Chirino *et al.* (2015), os quais discutem a eficácia do uso de softwares de simulação do traçado de diagramas ópticos para a aprendizagem significativa.

¹³ Pode parecer estranho dizer que a luz é invisível, mas jamais observamos a luz *per se*, e sim os objetos que a emitem ou nos quais ela reflete.

¹⁴ <https://www.geogebra.org/?lang=pt> .

4.2.4. Espelhos planos

Espelhos planos permeiam a vida cotidiana, fato ao qual atribuímos a variedade de propostas didáticas sobre os mesmos. Os artigos incluídos nesse item apresentaram, em linhas gerais, um menor grau de rigor algébrico, com propostas mais adequadas ao Ensino Médio. Vale lembrar que alguns artigos que incluíam espelhos planos em seus estudos foram revisados em outros itens, por se dedicarem de forma mais sensível à formação de imagens ou aos princípios da reflexão, por exemplo.

A variedade nas abordagens sobre espelhos planos na literatura é marcante: Ribeiro (2017), por exemplo, relata como seus estudantes desenvolveram propostas de intervenção em um banheiro mal projetado na escola, o qual permitia que um observador externo observasse o que acontecia no interior do recinto por reflexão no espelho. A atividade se revelou como forte impacto motivacional, permitindo um trabalho de investigação, discussão e comparação entre as propostas. Já Watanabe e Hosokawa (2016) discutem os contos de Machado de Assis e Guimarães Rosa, ambos intitulados *O espelho*, sob um ponto de vista físico, enfatizando as propriedades da imagem em um espelho plano.

Assim, a onipresença desses instrumentos ópticos na vida diária pode levar um professor de Física a acreditar que seus estudantes terão facilidade em compreender a formação de imagens nos mesmos. Mansell (2007) discorda dessa visão, propondo uma atividade bastante simples para demonstrar a posição da imagem em um espelho plano, utilizando um CD para tal. Gluck (2002) também propõe a experimentação com CDs, mas ressaltando que esses dispositivos podem ser usados como redes refletoras difrativas. Já Ribeiro (2016d) demonstra que nem sempre a simetria é observada para as imagens em um espelho plano, pois ao se colocar um CD à frente de um espelho, as cores observadas na imagem se mostram diferentes das observadas no CD real, devido aos efeitos de difração que um CD produz.

O artigo de Baird (2014) rediscute um problema didático clássico: o cálculo do espelho de mínimo tamanho para que uma pessoa observe sua imagem de corpo inteiro, para mostrar o quanto o ideário discente pode se enganar nesse tópico. O intrigante questionamento do autor versa sobre o tamanho necessário para que uma pessoa pudesse ver a sua imagem por completo, como no problema didático, mas considerando o observador em pé na Lua. É conduzida uma prova algébrica simples e uma sugestão de atividade experimental, na qual a imagem do observador em um espelho distante é

vista através de uma luneta, para a demonstração não intuitiva sobre o tamanho constante do espelho (igual à metade da altura do observador) para essa visualização de corpo inteiro, independentemente da distância entre o observador e o espelho.

As imagens virtuais formadas por espelhos planos apresentam a propriedade do *enantiomorfismo* (figura 17): a imagem de um objeto se apresenta reversa em relação a ele, com o espelho funcionando como plano de simetria. Segundo o artigo de Providência (2009), é simples perceber esse fenômeno olhando para as próprias mãos, pois a mão esquerda é enantiomorfa (ou *quiral*) da direita. O artigo de Deweerd e Hill (2004) trata não apenas da simetria, mas também da lateralidade observada na imagem, ou seja, se as imagens observadas em espelhos de formatos diversos (côncavo, convexo, plano) sofrem rotação em algum eixo, quando observadas ou projetadas. Por sua vez, Featonby (2016) discute o lúdico e intrigante caso de como seria o movimento da imagem refletida em um espelho plano de um ponteiro de relógio que se movesse no sentido anti-horário.

Figura 17. Um gato e sua imagem enantiomorfa refletida em um tampo de vidro ¹⁵.



Fonte: fotografia de João Afonso Oliveira (2010).

Ainda no tocante à simetria da imagem em um espelho plano, Yurumezoglu (2009) acredita que essa é uma característica que não deva ser tratada pelo professor apenas de forma abstrata, dadas as possibilidades de entretenimento, descoberta e investigação subjacentes ao tema. O autor propõe uma atividade bastante simples para o estímulo dessas possibilidades, onde imagens de objetos planos e tridimensionais em um espelho plano são comparadas entre si. Para melhor entendimento dos princípios da

¹⁵ O gato da fotografia chamava-se *Timbinho* e pertencia à mãe do autor. O felino faleceu em 2011.

reflexão e das características da imagem em um espelho plano, Yurumezoglu e Oguz-Unver (2010) propõem partir o espelho em diversos espelhos menores, permitindo diversas configurações desses elementos, para que os alunos possam conduzir suas próprias investigações a respeito da maneira como tais imagens são formadas. A característica de simetria entre imagem e objeto também é utilizada por alguns autores em analogias entre a Óptica Geométrica e vertentes artísticas, como a arte étnica da Índia e algumas regiões da África (BAPAT, 2009) e os tradicionais azulejos decorativos, introduzidos pelos árabes em Portugal (PROVIDÊNCIA e PROVIDÊNCIA, 2014).

O caráter lúdico das atividades envolvendo esses elementos ópticos emerge também nos trabalhos de Gardner (1999) e Thompson e Mathieson (2001), que apresentam duas propostas simples para criar a sensação de que um objeto está levitando no espaço. Gough (2006) já utiliza um disco de vinil e uma fonte de luz para criar um efeito de um feixe luminoso tridimensional cruzando o centro do disco. Carlson (2014) destaca outra aplicação desses elementos, não pelo seu caráter lúdico, mas utilitarista: na Segunda Guerra Mundial, os soldados americanos receberam um espelho de sinalização, um equipamento bastante simples, de tamanho equivalente a um cartão de crédito atual. O aparato era composto de um espelho plano do qual era retirada uma pequena cruz na área central. Em caso de necessidade de resgate, o soldado deveria usar o espelho para direcionar os raios de luz solar para um avião de resgate, a fim de que sua localização pudesse ser estabelecida pelo piloto. A cruz servia como visor, garantindo o alinhamento da luz do sol com o avião.

Um conjunto de trabalhos lida com a projeção da luz do Sol a partir do uso de espelhos planos, em especial o caso particular da projeção da imagem do Sol durante um eclipse. O trabalho de Silveira e Axt (2001) afirma que a partir de uma montagem apropriada, utilizando-se apenas espelhos planos, pode-se observar uma imagem real do Sol e até mesmo projetá-lo durante um eclipse, sem risco para os observadores. Essa proposta é corroborada por Bartlett (1996), que demonstra em que condições um pequeno espelho plano pode ser usado para fins de projeção, de forma análoga a uma câmara escura. Nessas situações, o espelho plano projeta uma imagem real, possibilidade pouco discutida nos livros didáticos e ressaltada por Silveira e Axt (2007).

Três trabalhos discutem a mesma atividade experimental: a projeção da sombra de uma imagem virtual, com a consequente produção de uma sombra dupla. Para conseguir esse efeito, basta que um objeto vertical esteja disposto sobre um espelho

plano horizontal, iluminado pela luz solar ou por uma fonte de luz distante, e haja uma parede vertical próxima. Russell (2010) obtém tal efeito usando uma lâmina de vidro, enquanto Cepic (2006) utiliza um espelho tradicional e a luz emitida por um retroprojetor em substituição da radiação solar, para que a atividade experimental possa ser conduzida em um ambiente interno, como um laboratório ou sala de aula. Já Ribeiro (2016b) correlaciona tal situação, apresentando um aparato experimental simples (espelho, boneco e parede) para simular o espetáculo de dança contemporânea *Gravité*, no qual o artista se movimenta sobre uma fina lâmina de água, projetando sua sombra em uma tela vertical no fundo do palco.

Um grupo de artigos se destacou nesse item por se dedicar a um tipo de espelho desconhecido por nós, o *espelho mágico chinês* (ou oriental). Conforme Mills (2011) explica, esses aparatos (figura 18) são peças metálicas planas de bronze, esculpidas com algum motivo gráfico em um único lado. Entretanto, se tais peças forem iluminadas pelo seu lado oposto (não esculpido), a luz refletida pode ser projetada em uma parede, e uma imagem do motivo esculpido é visível nessa parede.

Figura 18. “Espelho mágico” oriental.



Fonte: <<https://lemurking.files.wordpress.com/2008/09/magic-mirror.jpg>>. Acesso: 01/11/2015.

Na realidade, há pontos de pressão no “espelho mágico” que são criados na face oposta durante o processo de polimento, podendo ser possível reproduzir o efeito com medalhões de latão baratos. Os artigos de Tao e Lee (1997) e Berry (2005) também trabalham com os espelhos mágicos orientais, sendo a abordagem do primeiro artigo

voltada para as aplicações didáticas, enquanto a proposta do último envolve um tratamento conceitual mais rigoroso da formação dessa imagem.

Três artigos exploraram a obtenção de franjas de interferência com espelhos planos. Esse experimento é conhecido como “espelho de Lloyd”, em reconhecimento à descrição conduzida por Humphrey Lloyd em 1837. Quando um espelho plano comum é iluminado por um *laser*, ocorre interferência entre a luz refletida pela fronteira entre o vidro frontal e o ar e aquela refletida pela película metálica que recobre o fundo do vidro. Projetando-se os feixes de luz em uma parede, são observadas áreas claras e escuras espaçadas, típicas do fenômeno da interferência.

Cavalcante e Rodrigues (2012) defendem que essa é uma experiência ótima para demonstrar a reflexão e a interferência em sala de aula, tanto do ponto de vista qualitativo quanto quantitativo, mas encaram que o potencial didático da mesma é mal aproveitado. Catelli e Lazzari (2004) desenvolvem a mesma atividade experimental, mas fazem uma pequena modificação, retirando a lente colimadora do apontador *laser* e usando uma lâmina de vidro comum ao invés do espelho. De acordo com os autores, os resultados obtidos são “empolgantes”, devido ao intenso contraste entre as áreas claras e escuras e também pelo fato dos alunos poderem perceber que a interferência ocorre a partir de duas fontes luminosas, o objeto real e sua imagem virtual. Uysal (2010) também trabalha com a mesma atividade experimental, mas com a intenção de descobrir o índice de refração do vidro que compõe o espelho.

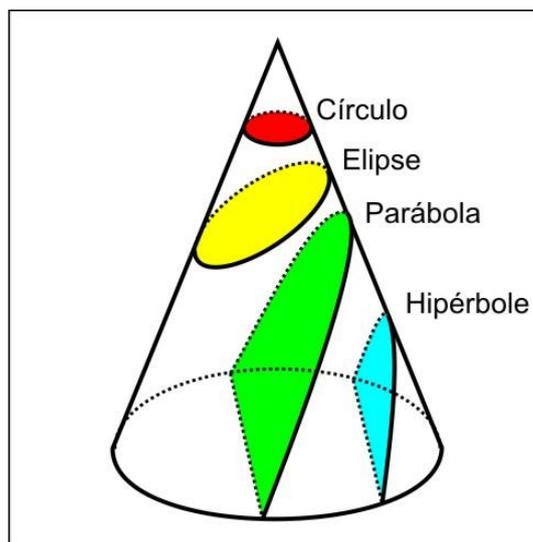
4.2.5. Espelhos curvos

Há dois tipos básicos de espelhos curvos: côncavos (como um espelho de aumento) e convexos (como um retrovisor de bicicleta). A forma geométrica também é levada em conta na nomenclatura de tais espelhos, existindo espelhos esféricos, elípticos, parabólicos, hiperbólicos, entre outros. Devido à grande variedade de aplicações, é nesse tópico que se concentram as pesquisas sobre o ensino e a aprendizagem da reflexão luminosa.

Nos livros-texto de Física de Ensino Médio, espelhos curvos com geometria diferente da esférica são discutidos de forma esparsa. O tratamento aproximado para a formação de imagens em espelhos esféricos é baseado nas condições de aproximação de Gauss, que levam em conta a necessidade de raios paraxiais e o grau de curvatura do espelho ser pequeno. Tais condições também são convenientes para espelhos

parabólicos, conforme mostrado nos trabalhos de Castaño e Hawkins (2011) e Pena e Leitão (2012). Vale lembrar que a parábola é uma das quatro curvas cônicas (as outras são o círculo, a hipérbole e a elipse). Este nome é dado pela possibilidade de se obter uma curva com esse formato a partir de uma seção adequada de um cone (figura 19).

Figura 19. Curvas cônicas.



Fonte: desenho do autor (2015).

Alguns dos artigos incluídos nesse item se preocupam em expandir a discussão didática tradicional, mas sem a introdução de novos conceitos para o estudante. Esse é o caso do trabalho de Erb (1995), que utiliza a clássica atividade experimental de observação da imagem de uma vela à frente de espelhos planos e côncavos para discutir os princípios fundamentais da reflexão e a formação de imagens. Já Silveira *et al.* (2004) apresentam situações onde as imagens ditas invertidas, as quais são produzidas por espelhos côncavos, se apresentam direitas ao observador, dependendo da posição em que o olho esteja localizado. Uma adequada posição do observador permite que ele visualize uma imagem direita e menor que o objeto, não discutida pelos livros didáticos. Korsunsky (2005) apresenta outro problema clássico: como descobrir a posição da imagem quando água é colocada na superfície de um espelho côncavo. Infelizmente, a solução é apresentada apenas de forma teórica, sem uma demonstração experimental adjacente.

Adie (1997) também não busca desafiar os estudantes, apresentando um aparato bastante simples, construído com um apontador *laser* e um espelho plástico curvo, o qual permite demonstrar com facilidade a convergência ou divergência dos raios de luz

após a reflexão, permitindo que o estudante perceba que os raios se afastam ou se aproximam em uma direção perpendicular à propagação, em um paralelo com a representação geométrica tradicional dos livros didáticos. Preocupações pedagógicas também estão no cerne do artigo de Greenslade Jr. (2000), no qual é descrita uma aula experimental sobre a geometria de espelhos curvos para estudantes universitários de áreas não científicas. Na atividade proposta pelo autor, os próprios estudantes executam o traçado dos raios que incidem em espelhos curvos (feitos de lâminas plásticas que podem ser curvadas com facilidade), acompanhando com o lápis a “trajetória” tomada pela luz emitida por um *laser*.

Libertun (2003) discute outro exemplo costumeiro de uso de espelhos convexos no cotidiano: os espelhos retrovisores do lado direito dos automóveis (passageiro) e a mensagem “misteriosa” que alguns deles trazem (“*Cuidado! Os objetos no espelho estão mais próximos do que parecem!*”). O autor apresenta as razões físicas que explicam esse alerta, a partir do conceito de campo visual, conceito que costuma se restringir ao caso particular do espelho plano nos livros-texto de Ensino Médio. Salinas e Sandoval (2000) apresentam uma visão qualitativa como complementação dessa abordagem tradicional, trabalhando com a construção de campos visuais em espelhos curvos. Estes autores defendem que esse método de construção qualitativa pode levar os estudantes a entender melhor a formação de imagens parciais de um objeto, situação muito frequente na vida cotidiana e não apresentada em livros-texto. Por sua vez, De Jesus e Sasaki (2013) optam por interpretar as imagens observadas em espelhos esféricos côncavos a partir do conceito de aumento angular, pouco discutido nas obras didáticas.

As diferenças entre as imagens conjugadas por espelhos côncavos e convexos também se revelam onipresentes nas abordagens trazidas pelos livros didáticos. Deweerd e Hill (2005) contextualizam essa diferença de forma criativa, a partir da análise qualitativa das imagens observadas na superfície do chá em uma xícara. Os movimentos nessa superfície produzem imagens de fontes luminosas próximas que podem ser explicados a partir dos modelos tradicionais de construção geométrica presentes nos livros-texto.

A sugestão de atividades experimentais de baixo custo também se revela presente em alguns artigos. O trabalho de Almeida *et al.* (2013) apresenta uma proposta para produção de um conjunto didático para o estudo de espelhos esféricos, a partir do reaproveitamento de vidros de relógio, o qual permite boa qualidade nas imagens

produzidas e determinação de dados quantitativos. Ribeiro (2016c) propõe uma atividade experimental desenvolvida a partir de um globo de discoteca, um objeto esférico coberto por pequenos espelhos planos, o qual é capaz de espalhar a luz enquanto rotacional. Já Catelli e Reis (2004) trabalham com a reflexão da luz no bulbo de uma lâmpada incandescente, demonstrando a formação de duas imagens (uma real e outra virtual) no interior da lâmpada, pois o bulbo se comporta como dois espelhos independentes, um côncavo e um convexo.

O trabalho de Catelli e Reis supracitado encontra eco em diversos artigos. Keepports (2005) mostra que essas mesmas imagens, uma real e outra virtual, também são produzidas por reflexão em uma lente convergente de Fresnel, retirada de um retroprojetor; Ribeiro (2013) expande então a proposta anterior, mostrando que quatro imagens são formadas por reflexão em uma taça de vinho, e Toepker (2014) discute a visualização das quatro imagens de Purkinje no olho humano, as quais são formadas por reflexão na córnea, de maneira similar àquelas observadas na taça.

Enquanto os livros-texto, mesmo de ensino superior, costumam tratar apenas de aplicações de espelhos esféricos, são fartas as discussões envolvendo geometrias não esféricas na literatura acadêmica. Hare (2007), por exemplo, apresenta sugestões de projetos de aquecedores solares baseados em espelhos parabólicos, uma interessante junção da Óptica com a temática do meio ambiente. As construções indicadas são de baixo custo e pequeno grau de dificuldade, envolvendo placas de madeira e superfícies refletoras que possam ser curvadas no formato parabólico desejado, tais como espelhos plásticos, pedaços de um espelho plano quebrado ou papel alumínio.

Van Beveren *et al.* (2006) descrevem as propriedades da reflexão em espelhos esféricos convexos bastante populares entre os estudantes: as bolinhas espelhadas que adornam as árvores de Natal. A aparente simplicidade do objeto de estudo é ilusória, pois a determinação da posição da imagem em um espelho como esse só é possível através de uma equação biquadrática. A preocupação dos autores com um tema tão cotidiano se justifica, pois o tratamento de espelhos convexos em livros didáticos de Ensino Médio é acrítico, daí a vertente pedagógica usada no desenvolvimento do artigo. Um diálogo pode ser estabelecido entre esse trabalho e o artigo de Bongiovanni *et al.* (2000), o qual se dedica às imagens produzidas por reflexão e refração em “bolhas”, tais como aquelas produzidas com água e sabão.

As imagens em bolinhas de Natal são anamórficas, ou seja, distorcidas em relação ao objeto original. De Lima *et al.* (2017) trabalham com um tema correlato: a

produção de objetos anamórficos, dos quais uma imagem não distorcida pode ser observada corretamente, usando um sistema óptico (espelho, lente, etc.) ou sob um ponto de vista particular. Eles apresentam duas técnicas de produção de tais objetos, sendo que uma delas se baseia nos princípios da Óptica Geométrica. Também Araújo *et al.* (2017) discutem como as ilusões de óptica, como a formação de imagens anamórficas ou truques com espelhos planos, podem ser usadas para a apresentação de temas da Óptica Geométrica em sala de aula.

Em sua explanação sobre a multiplicidade de imagens em espelhos parabólicos, Coulet e Filippi (2013) trabalham também com a *cáustica*, uma aberração óptica muito comum no cotidiano. A cáustica (figura 20) é a curva onde raios de luz paralelos incidentes em um espelho côncavo são projetados. Discussões teóricas sobre essa curva estão presentes no trabalho de Avendaño-Alejo *et al.* (2010). O artigo de Escobar *et al.* (2008) também trabalha com a cáustica e outras aberrações ópticas, mas de forma experimental, a fim de demonstrar as aberrações esféricas e os padrões de desfoque de imagens em cursos introdutórios de Óptica.

Figura 20. Cáustica produzida pela reflexão da luz na superfície côncava de um recipiente cilíndrico.



Fonte: fotografia do autor (2014).

Vale ressaltar que a cáustica de reflexão é um dos temas trabalhados na nossa proposta didática, pois uma das atividades que os participantes da nossa pesquisa desenvolvem está descrita em um artigo de nossa autoria (RIBEIRO, 2016e), na qual apresentamos uma atividade prática para o traçado da curva cáustica. Nesse artigo, trabalhamos com uma imagem obtida no *Google Maps* para a Procuradoria Geral da

República, a qual mostra os prédios circundados por projeções de raios de luz refletidos em sua fachada espelhada. A cáustica pode ser obtida a partir do prolongamento de tais projeções. A principal diferença em relação aos trabalhos anteriores é a obtenção de uma curva cáustica a partir de uma superfície refletora convexa, enquanto os autores supracitados se dedicavam aos espelhos côncavos.

Na literatura revisada, foi mais frequente a presença de discussões qualitativas sobre esse fenômeno, como a conduzida por Catelli e Vicenzi (2004), que observam a cáustica na luz refletida pela face cilíndrica côncava de uma xícara, enquanto Ferraro (1996) a percebe em anéis. Por sua vez, Vollmer e Möllmann (2012) a correlacionam com as zonas de aquecimento produzidas por edifícios de fachadas côncavas, os quais são recobertos por janelas refletoras. A formação da cáustica de reflexão em objetos tão cotidianos e diversos como xícaras, anéis e edifícios, evidencia a importância do fenômeno e fornece argumentos para refutar a sua tradicional ausência nos livros-texto de Ensino Médio.

Espelhos parabólicos também podem ser obtidos de forma inusitada, a partir de um líquido em rotação. Se um líquido é agitado com uma colher em movimentos circulares, observa-se uma curvatura na superfície: um parabolóide de revolução. Graumann e Laue (1998) propõem um aparato possível de ser reproduzido no Ensino Médio, usando um líquido em rotação e um inclinômetro, incluindo diversas sugestões de atividades experimentais que podem ser realizadas com a montagem. Chandler (2001) dispensa o próprio espelho para explicar o comportamento dos espelhos parabólicos, preferindo apresentar uma atividade de construção de um modelo desse formato de superfície usando dobraduras em papel. Segundo o autor, as propriedades refletivas da parábola, tais como a localização do foco, emergem naturalmente da atividade concreta, a qual pode também ser generalizada para elipses e hipérbolas. Os espelhos parabólicos também são o tema do artigo de Rodrigues e Mackedanz (2018), os quais buscam integrar a Física e a Matemática a partir de uma atividade de construção (nomeada *hands-on* pelos autores) desses espelhos, os quais eram utilizados na sequência como objetos motivadores para a construção do conceito de função polinomial de 2º grau na Matemática.

Espelhos que não tenham o formato de curvas cônicas também estão presentes na literatura. Deweerd e Hill (2006) discutem as intrigantes propriedades ópticas do espelho helicoidal, um popular elemento decorativo em jardins, além das possibilidades de exploração pedagógica dos mesmos. Estes mesmos autores (DEWEERD e HILL,

2005), em artigo anterior, haviam discutido de forma teórica as características das imagens formadas em espelhos cilíndricos côncavos e convexos. Já o artigo de Causat *et al.* (2006) recomenda o uso de uma superfície cilíndrica côncava, obtida com uma chapa metálica curvada nesse formato, para a projeção de uma pseudoimagem, conceito inexistente em livros didáticos.

Entre tantos trabalhos, foi motivo de estranheza para nós a relativa carência de propostas interdisciplinares. O trabalho de Vollmer e Möllmann (2012), citado no subitem voltado às relações entre a Física e a Arquitetura, se revelou uma exceção nesse tópico. Outra louvável ressalva é o artigo de Colicchia *et al.* (2009), que modela o olho das vieiras (um molusco) a partir de um espelho côncavo.

Vale ressaltar aqui que consideramos que a discussão de espelhos curvos no Ensino Médio não deveria se limitar à geometria esférica, como a grande maioria dos artigos citados nesse item assim o faz. Afinal, podemos entender um espelho plano como uma superfície plana em duas dimensões perpendiculares (altura e largura, por exemplo), enquanto um espelho esférico é curvo em duas dimensões. Já um espelho cilíndrico é plano em uma dimensão e curvo em outra. A nosso ver, um tratamento ainda que qualitativo de um espelho cilíndrico como um intermediário entre um espelho plano e um esférico poderia contribuir para um melhor entendimento das imagens formadas nesse último.

4.2.6. Associações de espelhos

Estão presentes neste item as pesquisas que utilizaram mais de um espelho para suas análises. Associações de espelhos se adequam ao desenvolvimento de atividades experimentais didáticas, pois a multiplicidade de imagens exige abordagens mais elaboradas, mobilizando diversas habilidades mentais dos estudantes. Assim, a maior parte dos artigos desse item é composta por propostas de atividades experimentais. Há exceções: Silva (2012), por exemplo, desenvolve um trabalho exclusivamente algébrico sobre diversas associações de espelhos esféricos dispostos frente a frente. Já o artigo de Evans (1996) apresenta as dificuldades conceituais que os estudantes apresentam no traçado de raios entre espelhos planos associados em ângulo. Não há uma sugestão de atividade experimental *per se* no artigo, mas a descrição da atividade permite caracterizá-la como uma atividade experimental de “lápiz e papel”.

Edifícios com fachadas espelhadas podem ser modelados como espelhos de diferentes formatos, fato que interessa sobremaneira à nossa pesquisa. Esse é o tema de um artigo nosso (RIBEIRO, 2015c), no qual os prédios da Procuradoria Geral da República são modelados como uma associação de espelhos cilíndricos. No artigo, sugerimos diversas atividades experimentais que podem ser feitas com um modelo em escala reduzida (duas lixeiras cromadas), várias das quais estão presentes na metodologia da pesquisa aqui relatada.

Instrumentos ópticos diversos utilizam associações de espelhos planos em sua configuração. Esse é o caso dos caleidoscópios tradicionais, onde imagens surreais são observadas devido às múltiplas reflexões em espelhos planos. Estes espelhos formam a face de um prisma, em geral de formato triangular. Greenslade Jr. (2009) descreve como a utilização de grandes espelhos para a sua construção pode trazer vantagens didáticas, enquanto Omelczuck *et al.* (2017) relatam as condições que levaram à invenção do caleidoscópio por Sir David Brewster no século XIX e propõem aplicações interdisciplinares para o equipamento, correlacionando a Óptica com temas da Arte.

O periscópio de submarinos é outro instrumento óptico que utiliza espelhos planos associados, levando Amann (1996) a discutir os vários posicionamentos que tais superfícies refletoras poderiam assumir nesse instrumento. Rovšek (2010), por sua vez, apresenta uma sugestão de associação de três espelhos planos perpendiculares entre si para explicar os princípios físicos do olho-de-gato (ou *catadióptrico*), popular elemento de sinalização em estradas de rodagem.

Dois espelhos planos paralelos ideais formariam um número infinito de imagens (em teoria), as quais seriam percebidas por um observador como um “túnel virtual”. Na prática, como os espelhos cotidianos não possuem refletância total para todas as frequências, as múltiplas reflexões terminam por mostrar cores com tom esverdeado para as imagens geradas por um maior número de reflexões, evidenciando a cor dos espelhos, como percebido por Lee e Hernández-Andrés (2004). O caráter das infinitas imagens produzido por dois espelhos planos paralelos também é discutido por Fadeev (2015), em uma atividade didática produzida a partir de uma cena do filme *A Origem*, na qual são conjugadas imagens do personagem vivido pelo ator Leonardo di Caprio.

Dois ou mais espelhos em ângulo fornecem imagens bastante diferenciadas, dependendo do arranjo entre os mesmos. Se objetos extensos forem utilizados, imagens excêntricas podem ser conseguidas nessas montagens, tais como ciclopes (RIBEIRO, 2014; RIBEIRO, 2016a) e triclopes (RIBEIRO, 2015b). Se um maior número de

espelhos for utilizado, a complexidade das imagens produzidas pode exigir análises diferenciadas, como o método dos espelhos virtuais (GREENSLADE JR, 2010).

4.3. Alguns comentários

Alguns riscos são inerentes à confecção de qualquer revisão bibliográfica. Entre outros, existe a chance de artigos escaparem ao “radar” do revisor; a divisão em categorias pode se revelar artificial ou incompleta; a abrangência geográfica e temporal da revisão pode ser limitada. Assim, é inevitável admitir a possibilidade de incompletude desse trabalho, quicá de qualquer revisão, devido a tais riscos. Entretanto, acreditamos que a variedade de revistas acadêmicas nacionais e internacionais, publicadas em quatro línguas diferentes, advindas de diferentes nacionalidades em um período de duas décadas, permite diminuir os riscos de abrangência dessa segunda parte da revisão.

Em particular, um dado que consideramos relevante para a nossa pesquisa é a inexistência de propostas de trabalho com a reflexão luminosa que lidem com visitas de campo, prática que decidimos adotar na proposta aqui relatada. Nesse aspecto, a visita de campo parece ser uma técnica pedagógica desconhecida ou, no mínimo, subvalorizada nas propostas que encontramos na literatura.

A revisão permitiu ainda estabelecer como manifesta a valorização do uso de materiais cotidianos em pesquisas experimentais por parte dos pesquisadores, principalmente em artigos voltados para o tratamento da Óptica no Ensino Médio. Embora tal conclusão não se apresente como novidade no Ensino de Ciências, ainda assim cabe ressaltá-la, pois a variedade de materiais utilizados pode impressionar: entre outros, encontram-se sugestões de aprendizagem do tema da reflexão luminosa a partir de espelhos de banheiro comuns (ROEDER, 2012), lâminas plásticas de retroprojetores (BERRY e KLEIN, 1997), poças de água da chuva (ALLOCO, 1999), xícaras de café ou chá (ZANARDI e MURAMATSU, 2011; DEWEERD e HILL, 2005), CDs (MOHAMMADPOUR, 2008; MANSELL, 2007; GLUCK, 2002), blocos de parafina e papel alumínio (TANTILLO, 2008), revestimentos metálicos em elevadores (GROSSMAN, 2014), colheres (BALTA e ERYILMAZ, 2011), azulejos decorativos (PROVIDÊNCIA e PROVIDÊNCIA, 2014), discos de vinil (GOUGH, 2006), medalhões de latão (MILLS, 2011), espelhos retrovisores de automóveis (LIBERTUN, 2003), taças de vinho (RIBEIRO, 2013), lâmpadas incandescentes (CATELLI e REIS,

2004), bolhas de água e sabão (BONGIOVANNI *et al.*, 2000), bolas de árvores de Natal (VAN BEVEREN *et al.*, 2006), espelhos decorativos de jardim (DEWEERD e HILL, 2006) e caleidoscópios (GREENSLADE JR., 2009). Essa diversidade de materiais e suportes aponta para uma grande facilidade de se pesquisar os fenômenos refletivos, levando à produção continuada de literatura acadêmica acerca do tema.

Cabe ressaltar ainda, no tocante ao tema dessa tese – a relação entre os fenômenos refletivos e as estruturas arquitetônicas no ensino de Física - a extensão e abrangência da revisão nos permite afirmar que o campo de trabalho é praticamente inexplorado, como afirmamos na introdução, característica que ajuda a realçar a importância e, quiçá, a necessidade da nossa pesquisa. Passamos então a refletir sobre quais teóricos poderiam nos dar suporte nessa pesquisa, ou seja, iniciamos a busca por referenciais teóricos adequados. O resultado dessa busca é exposto no capítulo a seguir.

5. REFERENCIAIS TEÓRICOS

Ao elaborarmos nossa metodologia de geração de dados, a qual será apresentada no capítulo seguinte, percebemos que desejávamos investigar três aspectos principais a partir das atividades didáticas que faziam parte de seu escopo: as possibilidades pedagógicas trazidas pela visita de campo e pelo trabalho com as atividades experimentais desenvolvidas a partir do sítio arquitetônico; a emergência de oportunidades para a aprendizagem colaborativa no contexto de tais atividades; e o desenvolvimento de uma nova visão do estudante sobre o espaço urbano.

Assim, percebemos a necessidade de um suporte adequado para cada uma dessas linhas de investigação. Sobre o papel das atividades experimentais e da visita de campo, consideramos que a reconceitualização da experimentação no Ensino de Ciências, proposta por Derek Hodson, permitiria evidenciar as possibilidades pedagógicas de nossas atividades. Já nos temas ligados à aprendizagem colaborativa, o referencial que consideramos mais adequado foi um recorte específico da psicologia histórico-cultural, teoria desenvolvida por Lev Vigotski. No tocante à reinterpretação do espaço urbano pelos estudantes, fizemos uma compilação do ideário acerca das Cidades Educadoras. Após a exposição individual de cada referencial, mostramos como as categorias de análise foram criadas para cada um deles.

5.1. Derek Hodson e a reconceitualização da experimentação

Durante a pesquisa conduzida para a confecção da nossa dissertação de mestrado (RIBEIRO, 2010), trabalhamos com atividades experimentais demonstrativas, utilizando um viés piagetiano interligado à defesa da reconceitualização do trabalho experimental, a qual foi proposta por Hodson em um clássico artigo publicado em 1994. O trabalho presente também se apoia nos pressupostos da reconceitualização, razão pela qual apresentamos uma rediscussão e ampliação da mesma nesse capítulo, a partir de leituras adicionais de outras obras do autor.

Não há carência de técnicas pedagógicas para a abordagem da reflexão luminosa, mas conforme nossa revisão bibliográfica (ver capítulo 3) demonstrou, o trabalho experimental é uma constante nas investigações sobre a aprendizagem desse tema, enquanto visitas de campo não apresentam tal destaque. Assim, decidimos pela incorporação de um método didático usual (experimentação) em contraste com uma

prática não exatamente habitual (visita de campo), a fim de seguir a defesa de Hodson (1994) por uma reconceitualização das atividades experimentais, fazendo com que as atividades experimentais sejam confrontadas com a teoria através da utilização de outras práticas pedagógicas.

Segundo o autor, o trabalho experimental ganhou destaque em aulas de Ciência a partir de meados do século XIX, inicialmente em aulas de química, e era justificado à época por “ensinar os alunos a aprender” (HODSON, 1993, p. 1). Nessa fase, o destaque estava nas demonstrações experimentais como confirmação de uma teoria prévia, realizadas pelo professor. Apenas ao longo do século XX o foco migrou para o trabalho experimental conduzido pelos próprios estudantes, com mudanças sensíveis na sua significância sendo verificadas a partir dos anos 1960 em países de língua inglesa (HODSON, 1985). Tais mudanças foram influenciadas pelo ideário de que considerações sobre a estrutura da Ciência, do conhecimento científico e do método científico deveriam ser mais relevantes no currículo escolar.

Hodson (1996) alerta que, embora o trabalho experimental tenha se alterado a partir desse período, a partir do uso de técnicas diversas interligadas às vertentes pedagógicas em voga a cada momento - como a aprendizagem pela descoberta ou elementos construtivistas - esse fato não minimizou as distorções da natureza do trabalho experimental pedagógico em relação à realidade da prática científica. Para o autor, três tópicos são mais relevantes, associados à Filosofia da Ciência: o papel das teorias científicas em uma atividade experimental, a natureza do método científico e os propósitos do trabalho experimental (HODSON, 1985).

A partir dessa preocupação, o estudioso desenvolve um aforismo que resume suas preocupações acerca do trabalho experimental: deve-se buscar “menos prática e mais reflexão” no Ensino de Ciências (HODSON, 1994, p. 308). Essa afirmação se justifica devido às atribuições os professores de Ciências encaram como intuitivas no trabalho experimental, as quais podem se revelar ilusórias, pois não se sustentam frente aos resultados apontados pelas pesquisas sobre o tema da experimentação. Dentre tais suposições intuitivas, são encontradas a motivação do interesse do aluno, o ensino das técnicas experimentais, a aprendizagem dos conhecimentos científicos, o desenvolvimento de noções do método científico e o desenvolvimento de uma “atitude científica”, como a postura crítica frente aos resultados.

Para o autor, nenhuma dessas suposições é sustentada pelos resultados de pesquisa. No tocante às técnicas experimentais, é grande o confronto entre a intuição e a

realidade: mesmo que a repetição e a prática sejam constantes, dificuldades no uso das aparelhagens experimentais se mantêm. O trabalho experimental pode ainda levar a distorções acerca da metodologia científica, favorecendo, por exemplo, o indutivismo, e não colabora para minimizar a visão estereotipada da Ciência como um esforço neutro e objetivo.

Consideramos importante frisar que discordamos de Hodson (1994) na sua afirmação acerca do fato do trabalho experimental não aumentar a motivação ou interesse do aluno pelo tema discutido, mas sim permitir colocar em prática métodos ativos de aprendizagem e também uma interação mais livre com o professor e colegas. Ao contrário, verificamos na nossa prática pedagógica um grande interesse dos estudantes pelo tema discutido quando práticas experimentais estão presentes em uma atividade didática, em contraste às situações nas quais as mesmas estão ausentes. Os resultados que encontramos em pesquisa anterior (RIBEIRO, 2010), na qual lidamos com atividades experimentais demonstrativas no ensino da Óptica Geométrica, confirmam o papel relevante desse interesse na aprendizagem de tópicos da Ciência.

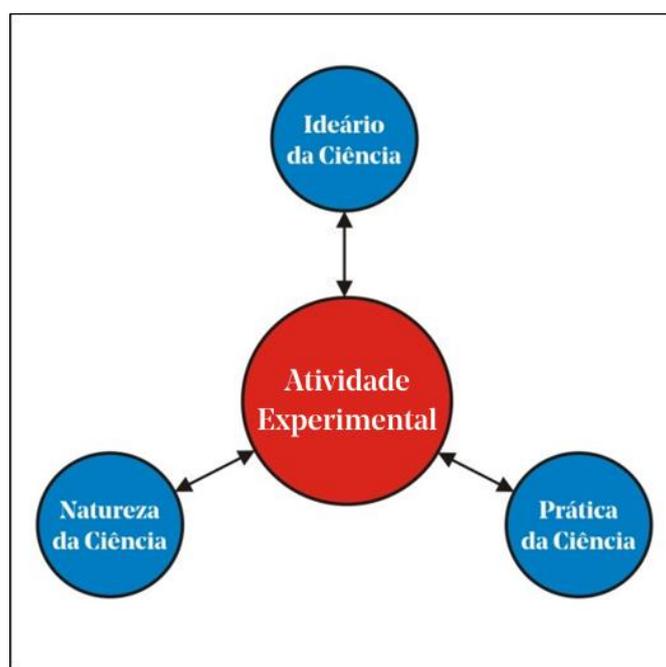
Vale ressaltar, entretanto, que Hodson (1994) se refere em seu texto não apenas às atividades experimentais didáticas, mas também às práticas tradicionais de laboratório – os “experimentos” *per se*. Como comentamos na apresentação desse trabalho, enquanto a atividade experimental demonstrativa na qual um espelho côncavo foi usado para queimar um papel foi fonte de intensa motivação e curiosidade, o uso de um banco óptico tradicional não teve esse mesmo resultado, em consonância com o proposto pelo autor.

Assim, a motivação e aumento de interesse não podem ser os únicos fatores que justifiquem o uso da experimentação enquanto prática pedagógica, mas desconsiderá-los por completo parece um exagero. Mesmo considerada tal ressalva, é dessa divergência entre a intuição dos professores de Ciências e os resultados de pesquisas sobre a experimentação que nasce a defesa pela reconceitualização das atividades experimentais. Assim, Hodson (1994) defende uma visão crítica do trabalho experimental, a partir de uma abordagem ditada pelos princípios teóricos subjacentes. Assim, a experimentação não deve ser utilizada em demasia (panaceia educacional) ou utilizada de forma precária.

Nasce dessa divergência entre a intuição dos professores de Ciências e os resultados de pesquisas sobre a experimentação a defesa pela reconceitualização das atividades experimentais. Em um nível mais operacional da sua proposta, Hodson

(1994) defende que a inclusão de uma atividade experimental em um contexto de Ensino de Ciências deve relevar três aspectos, chamados nessa tese de *Tríade de Hodson* (figura 21): promover a *aprendizagem da Ciência*, onde o trabalho experimental colabora para a incorporação do ideário científico pelos estudantes e as atividades experimentais funcionem como estímulos para esse desenvolvimento; estimular a *aprendizagem sobre a natureza da Ciência*, fazendo com que o estudante perceba as fases da atividade científica e a natureza provisória do conhecimento em Ciência, inspirado pelas doutrinas da Filosofia da Ciência; e promover a *aprendizagem da prática da Ciência*, fazendo com que o resultado da prática experimental seja discutido e confrontado com a teoria (ou outras atividades experimentais), através da utilização de outras práticas pedagógicas, tais como debates ou estudos de casos históricos, a fim de ajudar o estudante a compreender como a Ciência dá valor a uma investigação.

Figura 21. Tríade de Hodson sobre o papel das atividades experimentais.



Fonte: desenho do autor.

No esquema que construímos para a tríade, a experimentação está ligada ao ideário científico por uma dupla seta, assim como nas demais ligações. A intenção dessa dupla seta é mostrar que uma atividade experimental pode ajudar na compreensão de uma ideia científica, mas o oposto é igualmente verdadeiro: uma ideia científica ajuda na formulação e construção de uma atividade experimental.

Acreditamos que essa defesa de Hodson (1994) se correlaciona com nosso primeiro objetivo geral, no qual desejamos analisar se uma proposta de trabalho a partir de estruturas arquitetônicas favorece a aprendizagem da reflexão luminosa. Ao trabalharmos dessa forma, estamos evitando desenvolver atividades experimentais descontextualizadas, uma prática comum em laboratório. Ao contrário, desenvolvemos tais atividades a partir de uma maquete representativa das situações observadas no espaço urbano, contribuindo para uma correlação entre a prática da pesquisa e o mundo cotidiano, um aspecto desejável na aprendizagem das Ciências.

A oportunidade de comparar os fenômenos físicos observados em dois ambientes distintos (espaço urbano e laboratório) permite que o estudante perceba as limitações de uma pesquisa científica, pois nenhum modelo experimental corresponde de forma fiel à realidade, dada a natureza provisória e aproximativa do conhecimento científico. Por fim, consideramos ainda que o estudante pode comparar e conectar as práticas pedagógicas aplicadas na pesquisa (visita de campo *in loco* e trabalho experimental inspirado pelas estruturas arquitetônicas observadas), fazendo com que as atividades experimentais não sejam meras demonstrações dos fenômenos cotidianos, mas instigadores de investigação e facilitadores de compreensão dos conceitos científicos.

Criamos, assim, um conjunto de subcategorias *a priori*, as quais compõem a categoria principal da *Reconceitualização*. O pensamento de Hodson (1994) gerou três subcategorias de análise imediatas: *Natureza da Ciência*, *Ideário da Ciência* e *Prática da Ciência*, as quais foram subdivididas em um terceiro nível de subcategorização. A codificação completa está exposta no Quadro 1.

O próprio autor já nos sugere algumas possibilidades a serem investigadas nas falas dos estudantes. No quesito da Natureza da Ciência, ele se refere à dependência teórica entre a observação e a atividade experimental (subcategoria *Teoria e realidade*), a importância da *Construção de hipóteses* pelos estudantes e a possibilidade de *Descrição de fenômenos* que uma atividade experimental sempre traz.

Hodson (1994) defende ainda que a compreensão da natureza da Ciência pelos estudantes é ampliada quando eles próprios realizam suas experiências, gerando a subcategoria *Experimentação espontânea*. Observamos aqui um paralelo com um objetivo específico dessa pesquisa, no qual desejamos verificar a ocorrência de interações espontâneas dos estudantes com as maquetes, entre as quais a possibilidade de experimentar por si mesmo está incluída. A experimentação espontânea, nesse

contexto, pode funcionar como aquisição de autonomia na aprendizagem pelo próprio estudante.

Quadro 1 - Categorias *a priori* construídas a partir do ideário de Derek Hodson.

Categoria	Descrição
Reconceitualização	Correlação entre a proposta didática e o papel da reconceitualização da experimentação na aprendizagem em Ciência.
Natureza da Ciência	Percepção das fases da atividade científica e da natureza provisória do conhecimento em Ciência.
Descrição de fenômenos	Os estudantes buscam observar e descrever um fenômeno, sem necessariamente apresentarem uma explicação correta para o mesmo.
Construção de hipóteses	Sugestões de possíveis explicações para um fenômeno e/ou teste da viabilidade de tais explicações.
Experimentação espontânea	Os próprios estudantes desenvolvem alguma atividade experimental para testar ou confirmar uma ideia.
Teoria e realidade	A experimentação cria uma conexão entre a teoria formal e algum aspecto do mundo real.
Ideário da Ciência	O trabalho experimental colabora para a incorporação do ideário científico e as atividades experimentais funcionam como estímulos.
Ideias prévias	Os estudantes expõem suas ideias explicativas prévias sobre um fenômeno.
Reelaboração	Após intervenção do professor ou colegas, um estudante revisa sua ideia explicativa inicial.
Compreensão	Situações nas quais é buscada ou obtida a compreensão de conceitos científicos formais.
Prática da Ciência	O resultado da prática experimental é discutido e confrontado com a teoria ou outras atividades experimentais.
Confronto	Os resultados obtidos são confrontados entre si ou com a teoria formal.
Relevância	O estudo de um problema específico é discutido ou apresentado como mais relevante que outros.
Sociabilidade	A prática científica envolve um esforço coletivo.
Ausência de experimentação	Situações nas quais um estudo científico é conduzido sem um experimento <i>per se</i> .

Fonte: quadro do autor construído a partir de planilha gerada pelo aplicativo *webQDA*.

No tocante à aprendizagem do ideário da Ciência, o texto de Hodson (1994) gerou as subcategorias da *Compreensão* (casos em que a atividade experimental leva à compreensão de conceitos científicos formais por parte dos estudantes), *Ideias prévias* (quando os estudantes apresentam suas ideias explicativas iniciais sobre um fenômeno) e *Reelaboração* (quando, após intervenção do professor ou colegas, um estudante revisa sua ideia explicativa inicial sobre um fenômeno).

Aqui também podemos observar um paralelo com um objetivo específico nosso, a identificação dos conceitos ligados à reflexão luminosa que se revelem como entraves para os estudantes. Afinal, compreender o ideário científico pode ser interpretado na prática como compreensão do conteúdo trabalhado, depois de suplantadas as barreiras que se interpõem entre o estudante e o conhecimento.

Em relação à aprendizagem da Prática da Ciência, Hodson também nos oferece subcategorias apropriadas, tais como o *Confronto* (quando os resultados de uma atividade experimental são confrontados com a teoria), a *Relevância* (identificação da importância maior de um problema de pesquisa sobre os outros) e a *Sociabilidade* (a prática científica como uma atividade coletiva). O autor destaca ainda a possibilidade de *Ausência de Experimentação*, pois a investigação científica nem sempre é experimental, podendo se valer de correlações ou pela busca sistemática de relações causa e efeito ¹⁶.

Estabelecido esse segundo referencial, a escolha de um referencial pedagógico se mostrou imperativa; afinal, a proposta aqui descrita envolve, em seu âmbito, a aprendizagem da reflexão luminosa. Embora pudéssemos trabalhar diretamente com a aprendizagem dos conceitos da Óptica (uma parte da nossa análise, como veremos no capítulo 7, foi feita sob essa égide), percebemos que não era esse o ponto nevrálgico que desejávamos abordar. Afinal, atividades experimentais em laboratório e visitas de campo são momentos onde, por natureza, o papel do professor se ameniza e a aprendizagem se dá por outros caminhos, em especial por formas colaborativas.

Na sua defesa pela reconceitualização das atividades experimentais, Hodson (1994, p.305) nos diz que “a prática científica é uma atividade complexa e é construída socialmente”. A frase pode ser considerada um gancho para a introdução do terceiro referencial da nossa pesquisa, voltado à aprendizagem colaborativa, na medida em que não se pode pensar em colaboração sem uma atividade social subjacente. E, no contexto

¹⁶ Vale frisar que a ausência de experimentação não elimina o reconhecimento da dimensão empírica, a qual é intrínseca às Ciências da Natureza.

da aprendizagem mediada pela interação social, destacam-se os escritos do psicólogo russo Lev Vigotski, que adotamos como referencial pedagógico dessa tese e passamos a descrever a seguir.

5.2. Lev Vigotski e aprendizagem colaborativa

O ideário de Vigotski – por vezes intitulado psicologia histórico-cultural - é bastante amplo. Nossa preocupação é mais específica, razão pela qual é apresentado aqui apenas um recorte das ideias vigostkianas que se referem à aprendizagem por via da colaboração, e complementamos esse recorte com o pensamento de autores que também trabalharam sob a perspectiva vigotskiana em suas pesquisas.

Vale também fazer aqui uma ressalva importante: Vigotski escreveu suas obras em russo, e tanto Prestes (2012) quanto Gredler (2012) argumentam que as respectivas traduções das obras tanto para o português quanto para o inglês, apresentam significativas deficiências e mesmo distorções em relação ao pensamento do autor. Assim, a fim de evitar o risco de apresentar ideias anacrônicas, a leitura de trabalhos do próprio Vigotski teve, necessariamente, que passar por uma atualização, realizada principalmente a partir dos dois trabalhos supracitados, na medida em que não somos capazes de ler os textos originais em russo ¹⁷.

Os principais pontos da teoria psicológica de Vigotski são apresentados da seguinte maneira por Ivic (2010):

Se houvesse que definir a especificidade da teoria de Vigotski por uma série de palavras e de fórmulas chave, seria necessário mencionar, pelo menos, as seguintes: sociabilidade do homem, interação social, signo e instrumento, cultura, história, funções mentais superiores. E se houvesse que reunir essas palavras e essas fórmulas em uma única expressão, poder-se-ia dizer que a teoria de Vigotski é uma “teoria sócio-histórico-cultural do desenvolvimento das funções mentais superiores”, ainda que ela seja chamada mais frequentemente de “teoria histórico-cultural” (IVIC, 2010, p.15).

Para os fins desse referencial, destacam-se na apresentação acima os termos *sociabilidade do homem e interação social*. Vigotski conjectura que o conhecimento é construído a partir da interação entre pessoas – ou seja, da colaboração. No contexto

¹⁷ Até mesmo o sobrenome *Vigotski* apresenta dificuldades de tradução para o português, aparecendo também em alguns dos artigos supracitados como *Vygotsky* ou *Vygotski*. Nesse trabalho, para fins de uniformidade, seguimos a grafia adotada por Prestes (2012) em todas as citações ao autor ao longo do texto. Nas duas obras do autor que consultamos para essa tese, a grafia do nome do autor é *Vigotski*.

educacional, a aprendizagem é mediada pela interação entre o indivíduo aprendiz e outro indivíduo que consiga desenvolver uma tarefa a contento - por exemplo, o professor. A nosso ver, os termos destacados se fazem presentes nas características da aprendizagem colaborativa, conforme expostas por Chaka (2010), em tradução nossa:

A aprendizagem colaborativa está no cerne das abordagens de aprendizado coletivo direcionadas ao aluno. Representa uma grande mudança das abordagens de aprendizagem dominadas pelo professor para uma visão mais igualitária da aprendizagem. É uma inovação metodológica que encoraja uma coprodução de conhecimento, uma codeterminação do significado, resolução de problemas coletivos e múltiplas perspectivas entre os alunos e entre os alunos e professores. Também melhora as habilidades cognitivas e aproveita diferentes estilos de aprendizagem. Acima de tudo, a aprendizagem colaborativa serve como um antídoto para as tendências de aprendizagem competitivas e competitivas. Como tal, promove um espírito comunitário e um senso de união entre os alunos. Mais importante ainda, ele age como um veículo para navegar e unir a diversidade cultural e o pluralismo linguístico (CHAKA, 2010, p.152).

Gaspar e Monteiro (2016) corroboram com o excerto acima, ao afirmarem que Vigotski não restringe a possibilidade de colaboração apenas à díade aluno-professor, permitindo a extensão dessa colaboração a toda a sala de aula – um exemplo de interação, portanto, literalmente social. Logo, a aprendizagem também pode advir do trabalho colaborativo entre estudantes de uma mesma sala ou grupo. Segundo o próprio Vigotski (2001):

Afirmamos que em colaboração a criança sempre pode fazer mais do que sozinha. No entanto, cabe acrescentar: não infinitamente mais, porém só em determinados limites, rigorosamente determinados pelo estado do seu desenvolvimento e pelas suas potencialidades intelectuais. Em colaboração, a criança se revela mais forte e mais inteligente que trabalhando sozinha, projeta-se ao nível das dificuldades intelectuais que ela resolve, mas sempre existe uma distância rigorosamente determinada por lei, que condiciona a divergência entre a sua inteligência ocupada no trabalho que ela realiza sozinha e a sua inteligência no trabalho em colaboração. (VIGOTSKI, 2001, p. 329).

Vigotski entende que há dois níveis de desenvolvimento de um aprendiz: o *real* e o *potencial*. O nível de desenvolvimento real envolve as atividades que o indivíduo pode realizar sem auxílio de outra pessoa, enquanto o potencial envolve as funções que esse mesmo indivíduo só é capaz de realizar com ajuda externa. Portanto, para haver possibilidade de aprendizagem, a colaboração entre pessoas deve ocorrer fora da *zona de desenvolvimento atual* (ou real) de um indivíduo, vindo a ganhar forma no âmbito da

zona de desenvolvimento iminente (ZDI) do aprendiz, a partir da interação dialógica.

Vigotski assim a define:

Ela [a zona de desenvolvimento iminente] é a distância entre o nível de desenvolvimento real, que se costuma determinar através da solução independente de problemas, e o nível de desenvolvimento potencial, determinado através da solução de problemas sob a orientação de um adulto ou em colaboração com companheiros mais capazes. (VIGOTSKI, 2007, p.97)

Cabe frisar que tal conceito (ZDI) é um dos mais difundidos da teoria vigotskiana, mas Vigotski não teve tempo de desenvolvê-lo totalmente: segundo Zaretskii (2011, p.70), sua morte trágica aos 37 anos “interrompeu seu pensamento sobre a zona de desenvolvimento imediato literalmente no meio da sentença”.

Prestes (2012) relata que no Brasil o termo original (*zona blijaichego razvitia*) já foi traduzido como *zona de desenvolvimento imediato* ou *zona de desenvolvimento proximal*. Segundo a autora, nenhum dos termos é adequado, e a ZDI é assim definida:

[...] exatamente aquilo que a criança consegue fazer com a ajuda do adulto, pois o que ela faz sem a ajuda, e não mediação, do adulto já se caracteriza como nível do desenvolvimento atual, que não apenas revela as funções amadurecidas, mas também “apalpa” as funções que estão em amadurecimento. Por tanto, aquilo que a criança faz sozinha é a zona de desenvolvimento atual (PRESTES, 2012, p.170).

A mesma autora ressalta que a ZDI não está limitada à relação aluno-professor e nem mesmo à atividade de estudo escolar, estando a mesma manifesta também em atividades de imitação, manipulação de objetos e brincadeiras em geral.

A ligação direta entre a aprendizagem colaborativa (ou colaboração entre estudantes em um grupo) e a ZDI pode ser traiçoeira. De acordo com Gredler (2012), Vigotski já chamava a atenção para o fato dos aprendizes não poderem, por si só, facilitarem seu próprio desenvolvimento cognitivo a partir de conversas realizadas apenas no âmbito do grupo, sem a presença do professor ou de um tutor experiente, pois o desenvolvimento alcançado sem tal intervenção pode ser de escopo limitado. Essa afirmação encontra eco no entendimento de Gaspar e Monteiro (2016, p.233), os quais defendem que “a interação social só pode existir efetivamente em relação ao desenvolvimento de uma tarefa, se houver, entre os parceiros que a realizam, alguém que saiba fazê-la”. Também Giordan (1999) defende que o professor esteja incluído no processo de colaboração, devendo atuar principalmente como um organizador do coletivo.

Não entendemos, entretanto, que a aprendizagem colaborativa não possa ocorrer no âmbito do grupo, pois, em nossa opinião, ela pode se dar por etapas progressivas. Como exemplo de tal progressão, um estudante pode compreender uma construção geométrica a partir da explicação do professor e usar partes dessa explicação para auxiliar outro estudante. Dessa forma, não vemos a necessidade da insistência na presença de um “adulto” em todas as etapas para que a colaboração entre os estudantes possa favorecer a aprendizagem. Vale perceber que Vigotski (2007) já ressalta o papel da colaboração na sua definição sobre a ZDI, incluindo a possibilidade de a colaboração ocorrer entre o estudante e o professor (adulto) ou entre os próprios estudantes.

Reforçamos nossa argumentação com o entendimento de Prestes (2012, p.169), para quem “Vigotski não diz que a instrução é garantia de desenvolvimento, mas que ela, ao ser realizada em uma ação colaborativa, seja do *adulto* ou *entre pares*, cria possibilidades para o desenvolvimento”¹⁸. Figueiredo (2003) também nos diz que atividades pedagógicas nas quais os estudantes possam interagir entre si tendem a aperfeiçoar ou incrementar a participação dos aprendizes nas mesmas, tornando-os também mais envolvidos no seu próprio processo de aprendizagem, em contraste com as situações didáticas tradicionais, nas quais a figura do professor é central. Assim, a colaboração permite que os alunos venham a trocar não apenas informações e conceitos, mas também estratégias de aprendizagem, fazendo com que mesmo os alunos mais experientes possam descobrir novas formas de aprender.

Ainda sobre a possibilidade de a aprendizagem colaborativa ocorrer no âmbito do grupo, Siqueira e Alcântara (2003) defendem que a interação entre os estudantes torna o contato com o conteúdo mais dinâmico. A mediação do professor nos grupos permite que os alunos avancem na análise crítica do conhecimento existente, assim como estimula a comunicação escrita ou oral. Tais autores defendem que os laboratórios didáticos – tais como o utilizado por nós nessa pesquisa - e a natureza das atividades realizadas nesses ambientes favorece tal interação, ao aliar um ambiente favorável com a natureza dos fenômenos estudados, minimizando a dicotomia teoria-prática. Trumper (2003) nos diz ainda que o trabalho colaborativo permite a avaliação e exploração das ideias individuais em um ambiente social, no qual os estudantes podem tomar consciência das ideias dos outros, confirmando ou refutando suas próprias ideias.

¹⁸ Itálico nosso.

Ainda no contexto do trabalho laboratorial, Gredler (2012) acredita que a aprendizagem colaborativa entre os estudantes de uma classe pode ser importante, principalmente no desenvolvimento de habilidades para trabalhos em equipe, enquanto Trumper (2003) nos diz que ambientes onde os alunos trabalham com outros em tarefas comuns, tais como os laboratórios, são vitais para a aprendizagem, pois ao trabalharem juntos em problemas, um aprendiz se apropria de um conhecimento novo em colaboração, para em seguida representá-lo individualmente. A nosso ver, essa afirmação fornece suporte a um dos objetivos específicos da nossa proposta, no qual desejamos identificar oportunidades para a aprendizagem colaborativa tanto na visita de campo quanto nas atividades experimentais no laboratório.

A categoria *Aprendizagem colaborativa* foi desenvolvida então a partir das ideias aqui expostas, e a mesma foi então dividida em duas subcategorias, novamente *a priori*: *Personagens* (os atores envolvidos na interação) e *Tipologia* (forma como se deu tal interação). O quadro 2 apresenta a divisão completa.

No tocante aos personagens, buscamos identificar se a interação se dava entre Estudante e colega(s) ou entre Estudante e professor. Nessa última interação, buscamos ainda perceber se a interação pedagógica tinha origem em um questionamento do estudante ou se era iniciada pelo professor. Já no tocante à tipologia, consideramos que três formas principais poderiam ser identificadas nas falas dos estudantes: o *Escambo conceitual* (troca de ideias, informações, conceitos), o *Escambo estratégico* (troca de estratégias de aprendizagem) e a *Organização do coletivo* (quando um personagem assume o papel de organizador da situação de aprendizagem), podendo o organizador ser o professor ou um estudante.

Estabelecidos esses dois referenciais, partimos para a definição de uma linha de pensamento que nos auxiliasse no tocante ao desenvolvimento de uma nova visão sobre o espaço urbano, parte da hipótese desse trabalho. Ao invés de nos centrarmos no ideário de um único autor, decidimos por construir um entendimento mais amplo sobre o conceito de Cidade Educadora, a partir do pensamento de autores que se dedicaram ao tema. Expomos o referencial construído a seguir.

Quadro 2. Categorias *a priori* desenvolvidas sobre aprendizagem colaborativa.

Categoria	Descrição
Aprendizagem colaborativa	Construção do conhecimento a partir da interação entre pessoas – ou seja, da colaboração.
Personagens	Interlocutores envolvidos em uma interação específica.
Estudante e colega(s)	O aluno interage com outro(s) estudante(s) do grupo.
Estudante e professor	Interação pedagógica entre um aluno e o professor.
Iniciada pelo estudante	O aluno inicia o questionamento ou discussão.
Iniciada pelo professor	O professor inicia um questionamento ou discussão.
Estudante e colega(s)	O aluno interage com outro(s) estudante(s) do grupo.
Estudante e professor	Interação pedagógica entre um aluno e o professor.
Iniciada pelo estudante	O aluno inicia o questionamento ou discussão.
Iniciada pelo professor	O professor inicia um questionamento ou discussão.
Tipologia	Forma com que se dá a interação social durante a situação de aprendizagem.
Escambo conceitual	Os personagens envolvidos na interação social trocam informações ou conceitos entre si, de forma recíproca ou não, a fim de facilitar a aprendizagem.
Escambo estratégico	Os personagens da interação social trocam entre si, de forma recíproca ou não, suas diferentes estratégias de aprendizagem.
Organização do coletivo	Um personagem da interação assume o papel de organizador da situação de aprendizagem.
Professor	O professor atua como organizador da situação de aprendizagem.
Estudante	Um aluno atua como organizador da situação de aprendizagem.

Fonte: quadro do autor construído a partir de planilha gerada pelo aplicativo *webQDA*.

5.3. Cidades Educadoras

De antemão, cabe discutir o porquê da inclusão de uma discussão acerca do conceito de Cidade Educadora como referencial teórico. A nosso ver, o espaço da cidade apresenta diversas possibilidades pedagógicas, mas o professor pode vir a se “refugiar” no ambiente escolar, mais controlado e previsível, ignorando, menosprezando ou desprezando por completo a atmosfera urbana na qual a instituição escolar se encontra. *Aprender na cidade*, nesse sentido, se transmuta em *apreender a cidade*, incorporando o ambiente externo à escola no processo de aprendizagem, razão pela qual consideramos significativa a discussão que passamos a apresentar.

Tanto o espaço urbano quanto o rural têm como tônica a intervenção humana sobre as condições antecedentes, sejam elas naturais ou modificações prévias introduzidas por ocupações humanas anteriores. No âmbito dessa tese, o conceito de espaço pertence ao domínio epistemológico da Geografia e não à Física. Buscamos então nos trabalhos do geógrafo brasileiro Milton Santos (2008) uma definição sobre o mesmo:

[O espaço é] algo dinâmico e unitário, onde se reúnem materialidade e ação humana. O espaço seria o conjunto indissociável de sistemas de objetos, naturais ou fabricados, e de sistemas de ações, deliberadas ou não. A cada época, novos objetos e novas ações vêm juntar-se às outras, modificando o todo, tanto formal quanto substancialmente (SANTOS, 2008, p. 46).

Entendemos que Santos (2008) defende o espaço como uma construção contínua: assim, o espaço urbano que se observa hoje resulta de ações naturais e artificiais ao longo da sua história, sendo por natureza mutável e adaptável. O paralelo com o conceito físico do espaço-tempo, chave para a teoria da relatividade de Albert Einstein, é quase imperativo: em outra obra, o autor entende as modificações na paisagem como “trajetórias espaço-temporais da matéria” (SANTOS, 2006, p.60). Assim, o espaço urbano pressupõe a integração entre o natural e o artificial, pois “a paisagem monumental da cidade é resultado da interação de seus arranjos urbanísticos e arquitetônicos com as características do sítio geográfico de implantação” (OLIVEIRA *et al.*, 2008, p.161). Tal paisagem, por sua vez, é o ambiente onde as relações sociais se desenvolvem:

Na verdade, espaço urbano e sociedade são duas faces da mesma moeda; ou seja, o espaço é um aspecto estrutural da cidade. Seu papel supera o conceito sociológico de suporte de atividades, pois não é um

meio rígido e neutro, mas capaz de oferecer possibilidades e restrições à realização de práticas. (KOHLSDORF, 1996, p.21)

Assim, não acreditamos ser exagero afirmar que o espaço urbano modernista brasileiro permeia – e mesmo delinea - as experiências individuais dos seus habitantes. Por ser impensável a existência humana na ausência de espaço, cremos como inevitável que as relações com o ambiente se tornem parte integrante das experiências de vida de qualquer pessoa; em última instância, as características de um espaço urbano condicionam a vida daqueles que dele usufruem. O arquiteto dinamarquês Jan Gehl (2013, p.9) resume assim o papel decisivo das intervenções humanas na vida cotidiana: “primeiro nós moldamos as cidades – então, elas nos moldam”.

Gehl (2013, p.4) defende também que a cidade deva ser vivenciada a partir dos sentidos humanos, em especial a visão e a audição, numa “cornucópia de impressões sensoriais”, dado que a cidade é um local de vivência e comunicação entre pessoas. A cidade deve ser entendida como um local para caminhar, permanecer, encontrar pessoas, se autoexpressar, se exercitar, entre outras atividades típicas do cotidiano. Um aglomerado urbano que traga oportunidades para as atividades supracitadas (e outras adicionais) é chamado uma *Cidade Viva*. O autor define a “vida entre edifícios” como “todas as diferentes atividades em que as pessoas se envolvem quando usam o espaço comum da cidade” (GEHL, 2013, p.19).

É interessante, entretanto, perceber que Gehl (2013) não chega a citar a cidade viva como um local para *aprender*, uma atividade em que pessoas estão sempre envolvidas e também um pressuposto dessa tese. Apesar dessa ressalva, acreditamos que uma Cidade Viva, a qual permita experiências tão diversas como as mencionadas pelo autor, se revelará por natureza um ambiente propício à aprendizagem.

Gehl (2013) defende ainda que a cidade deve ser um bom lugar para permanecer, ou seja, parar, olhar e interpretar a paisagem – *aprender* com a cidade, enfim. Observar a vida na cidade (entendida como as diferentes atividades humanas) é importante, mas observar aquilo que é belo (água, árvores, espaço, objetos arquitetônicos, obras de arte, entre outros) enriquece a experiência da vivência e da aprendizagem na cidade. Como Niemeyer (1978, p. 24) nos diz, “quando uma forma cria beleza, ela tem uma função e das mais importantes em arquitetura”.

A arquitetura tem um papel singular na concepção de uma Cidade Educadora. A profusão de formas arquitetônicas de uma cidade, segundo Oliveira *et al.* (2008) e Yáziği (2002), pode revelar sua história, cultura, forma, tecnologia e virtudes estéticas.

Acreditamos que esses aspectos não devem interessar apenas aos visitantes, mas também aos estudantes que residem, convivem ou transitam no espaço urbano, os quais assumem o papel de consumidores desse espaço, devendo ser munidos de ferramentas para interpretá-lo e analisá-lo; reescrevendo, de forma quase poética, deve-se permitir que eles venham a encontrar “forma e sentido no espaço” (PESAVENTO, 2005, p. 10).

Assim, encaramos o espaço urbano e suas representações visuais (fotografias, maquetes, entre outras) da mesma forma que Tonucci (1997), o qual estabelece a ideia da *Cidade Laboratório*: um espaço de investigação e educação, no qual os jovens podem opinar sobre sua cidade e discutir soluções para a mesma. Assim, a cidade se revela um espaço de aprendizagem privilegiado, com diversas possibilidades educadoras, permitindo abordagens de cunho técnico, artístico, histórico, entre outras.

Tal relação entre a aprendizagem e o espaço urbano permite entender a cidade como um espaço pedagógico não formal, a partir das afirmações de Gadotti (2005, p.5) acerca de uma *Cidade Educadora*: “a vivência na cidade se constitui num espaço cultural de aprendizagem permanente por si, espontaneamente, informalmente”. Assim, em nossa opinião, há uma janela de oportunidade para a aprendizagem na relação com a cidade, na medida em que as características das obras arquitetônicas que povoam um espaço urbano podem se revelar poderosas fontes de investigação de diversos temas das Ciências Naturais. Um excerto da Carta das Cidades Educadoras (AICE, 2004) ¹⁹, a seguir, corrobora essa visão:

Hoje mais do que nunca as cidades, grandes ou pequenas, dispõem de inúmeras possibilidades educadoras, mas podem ser igualmente sujeitas a forças e inércias deseducadoras. De uma maneira ou de outra, a cidade oferece importantes elementos para uma formação integral: é um sistema complexo e ao mesmo tempo um agente educativo permanente, plural e poliédrico, capaz de contrariar os fatores deseducativos (ASSOCIAÇÃO INTERNACIONAL DAS CIDADES EDUCADORAS, 2004, p.1).

Entendemos, assim, que a formação de cidadãos protagonistas envolve a capacidade de interpretar a sua vivência cotidiana a partir de conceitos das Ciências Naturais e evidenciar a importância de tais conceitos no seu cotidiano. O cidadão dos médios e grandes centros urbanos, cercado por estruturas arquitetônicas reluzentes, deve

¹⁹ AICE é a sigla para *Associação Internacional das Cidades Educadoras*, entidade não governamental fundada em 1994. Diversas cidades brasileiras são associadas a essa entidade. Brasília não se encontra entre elas.

se questionar sobre a funcionalidade e o impacto que as mesmas trazem ao ambiente circundante, e para tal, um ponto de vista mais técnico, construído por mediação pedagógica, pode vir a contribuir. Acreditamos que essa possibilidade de discussão dialoga com o ponto de vista de Gadotti (2005, p.7): em uma Cidade Educadora, busca-se “uma compreensão mais analítica e reflexiva [...] dos problemas do cotidiano”.

Olhar o espaço urbano sob um viés da Física possibilita, a nosso ver, diversificar o escopo e a abrangência desse olhar. Encaramos esse novo olhar como uma contribuição potencial dessa pesquisa. Podemos remeter aqui novamente a Kohlsdorf (1996), o qual defende que a formação da noção de espaço é um desejo essencial, universal e em construção permanente. Logo, propostas de aprendizagem que facilitem essa *apreensão* da cidade vão de encontro a esse anseio.

Nesse âmbito, Pesavento (2005, p.14) considera haver categorias privilegiadas de leitores do espaço urbano, tais como geógrafos, historiadores, antropólogos e sociólogos, os quais apresentariam “competência técnica específica e olhar sensível” para tal. Acreditamos, entretanto, que qualquer intérprete do espaço urbano, ainda que não citado pela autora, faz uma leitura de tal espaço sob um viés específico ligado à sua área de competência ou formação.

Assim, não acreditamos haver um privilégio de uma área sobre a outra, e sim uma possibilidade de complementação dessas leituras acerca da cidade, resultante dessas diferentes interpretações. Encaramos que essa argumentação suporta o nosso segundo objetivo geral, voltado ao desenvolvimento de uma nova maneira de olhar a cidade por parte dos estudantes após a proposta de ensino. Um olhar inspirado pelas teorias físicas pode se revelar tão ou mais interessante para os estudantes quanto as tradicionais formas de se olhar para uma cidade. Daí também termos como objetivo específico levantarmos as opiniões dos estudantes não somente sobre as atividades no convívio com a cidade em si, mas também nas práticas experimentais inspiradas pelas estruturas urbanas. Afinal, tais atividades experimentais também se incluem no desenvolvimento desse “novo olhar” sobre a cidade e suas estruturas.

Mais do que a ausência do ideário físico citado por Pesavento (2005), consideramos preocupante a ausência de uma leitura pedagógica sobre a cidade, pois o espaço urbano é um ambiente contínuo de aprendizagem para os jovens, como Gadotti (2005) ressalta em seu trabalho. Ademais, nossa principal interação com qualquer paisagem é através da luz transmitida ou refletida pelos seus elementos constitutivos,

justificando que uma abordagem do ponto de vista da Óptica seja tão relevante quanto os pontos de vista levantados por Pesavento (2005).

O conjunto de ideias aqui apresentadas nos levou a incluir a nova categoria de análise *Cidade Educadora*. Desenvolvemos então um conjunto de subcategorias *a priori* a partir desse primeiro referencial, as quais estão resumidas no Quadro 3.

Quadro 3. Categorias *a priori* desenvolvidas sobre o ideário das Cidades Educadoras.

Categoria	Descrição
Cidade educadora	A cidade e suas estruturas como um espaço de aprendizagem.
Arquitetura e Ciência	Relações entre as teorias científicas e os objetos arquitetônicos.
Planejamento	Situações em que os estudantes defendem a necessidade de um planejamento prévio em Arquitetura.
Estética	A beleza como uma função na Arquitetura.
Sentir a cidade	Aprender a cidade através dos sentidos (visão, audição) e pelo ato de caminhar pela área urbana.
Aprender na cidade	Situações em que partes ou o todo da cidade se revelam propícias à aprendizagem.

Fonte: quadro do autor construído a partir de planilha gerada pelo aplicativo *webQDA*.

A primeira subcategoria que emergiu nesse referencial, *Arquitetura e Ciência*, se refere das relações que os estudantes poderiam identificar entre as estruturas acadêmicas e os conceitos científicos, em especial aqueles voltados à Óptica Geométrica. Essa subcategoria também inclui as relações entre a Ciência com os projetos urbanísticos.

Como a pesquisa se desenvolveu em Brasília e é notório o fato da capital ter sido planejada, incluímos a subcategoria *Planejamento* para identificar as situações nas quais os estudantes acreditam ser necessário um plano prévio em Arquitetura. Inspirados pelos dizeres de Gehl (2013) e Niemeyer (1978), para os quais a beleza é parte inseparável da Arquitetura e tende a ser um dos aspectos relevantes para quem observa um edifício, decidimos também incluir a subcategoria *Estética*²⁰.

A sugestão de Jan Gehl (2013) sobre caminhar pela cidade a fim de apreender a mesma a partir dos sentidos humanos, em especial a visão e a audição, foi incluída

²⁰ É interessante perceber que a categoria Estética dialoga com a evolução da nomenclatura da metodologia de ensino STEM (acrônimo em inglês para os termos *Science, Technology, Engineering e Mathematics*) para STEAM (com a inclusão das Artes na proposta).

como a subcategoria *Sentir a cidade*. Já a proposta de Gadotti (2005) de que a cidade apresenta múltiplas possibilidades educativas, seja em partes da mesma (como prédios específicos) ou no seu todo, originou a subcategoria *Aprender na cidade*.

Antes de adentrarmos o capítulo voltado à metodologia, devemos afirmar que concordamos com Gehl (2013): não há melhor maneira de interagir com a cidade do que andar por ela. Se o espaço brasiliense, a princípio, dificulta o caminhar – fato que não questionamos – ao mesmo tempo, consideramos que visitas de campo são oportunidades para minimizar tal dificuldade. Assim, a visita que realizamos incluiu um ponto turístico tradicional (Palácio do Itamaraty) agregado a dois sítios externos às visões tradicionais de Brasília (Setor Bancário Sul e Procuradoria Geral da República). Tais estruturas urbanas são comumente vistas pelos habitantes da capital à velocidade de um carro; assim, parar o carro para olhar a cidade, pode contribuir para o desenvolvimento de um novo olhar sobre o espaço urbano. A visita de campo que aqui relatamos está descrita com maiores detalhes no próximo capítulo, voltado à geração de dados.

6. METODOLOGIA DE GERAÇÃO DE DADOS

Estabelecido o referencial de análise, passamos então à parte operacional da pesquisa, ou seja, a metodologia que usamos para a geração dos dados. Nossa pesquisa foi dividida em cinco fases: estudo-piloto, visita de campo, questionário prévio, atividades experimentais e questionário posterior. A seguir, apresentamos um detalhamento de cada uma dessas fases.

6.1. Estudo-piloto

Antes da qualificação do nosso projeto de pesquisa, foi realizado um estudo-piloto, no âmbito da disciplina de Educação em Ciências II, oferecida pela Faculdade de Educação (FE) da UnB, no âmbito do Laboratório de Ensino da Faculdade de Educação da Universidade de Brasília. Os participantes dessa fase eram estudantes de graduação em Pedagogia que cursavam essa disciplina. Pela natureza desse curso de graduação, o último contato que esses participantes haviam tido com a Óptica tinha sido no Ensino Médio, criando uma similaridade com o grupo de estudantes que esteve envolvido nas fases posteriores.

Usamos o estudo-piloto para testar os protocolos de geração de dados e fazer a definição final da metodologia que seria usada na próxima fase da pesquisa, nas quais o grupo de estudantes voluntários de Ensino Médio estaria envolvido. Esse estudo-piloto se iniciou com uma investigação sobre os conhecimentos prévios sobre reflexão da luz, a partir de um diálogo entre o pesquisador e o grupo, o qual foi registrado por meio de gravação de áudio. Não houve transcrição dessa gravação, na medida em que nossa intenção no estudo-piloto era conduzir apenas um teste preliminar da metodologia, para identificar suas potenciais falhas.

O estudo-piloto foi desenvolvido em dois encontros de duas horas-aula cada, um intervalo de tempo similar ao efetivamente gasto na fase seguinte da pesquisa. Como não era possível fazer a visita de campo, devido ao pequeno tempo disponível, ambos os encontros se iniciaram com a apresentação de fotografias das estruturas arquitetônicas escolhidas, assim como dos efeitos ópticos que as mesmas exibem, em especial a formação de imagens.

Nossa ambiciosa intenção original era trabalhar com três sítios arquitetônicos: Setor Bancário Sul (A), Palácio do Itamaraty (B) e Procuradoria Geral da República (C). Assim, no primeiro encontro, apresentamos duas atividades experimentais (A e B)

ao grupo de participantes, e no segundo encontro, trabalhamos com a atividade experimental C. As maquetes utilizadas na geração de dados no estudo-piloto foram desenvolvidas como representações em menor escala de três sítios arquitetônicos escolhidos, permitindo sua manipulação pelos participantes.

O trabalho direto dos participantes com a atividade experimental tinha a intenção de induzir que os estudantes investigassem algumas aplicações da reflexão luminosa, a partir de três protocolos de investigação no modelo *aprender/ensinar* (McBRIDE, 2009), os quais foram elaborados por nós e estão disponíveis no Apêndice B, enquanto o protocolo usado na pesquisa definitiva compõe o Apêndice C. Nesse modelo de investigação, um roteiro pré-estruturado de perguntas foi elaborado, a fim de guiar o trabalho experimental dos estudantes, mas dependendo das respostas dos alunos, novas questões podiam ser colocadas. Como alertado por um membro da banca de qualificação, pode-se considerar, a princípio, tal protocolo de investigação como similar a um roteiro de laboratório.

Nosso papel não poderia equivaler a um pesquisador externo à situação social observada, devido às nossas preocupações pedagógicas subjacentes. Daí nossa escolha por uma investigação no modelo *aprender/ensinar* supracitado: durante os encontros, discutimos os questionamentos com os estudantes, investigando e instigando as dúvidas que surgiam no contexto da interação social, e por vezes, se necessário, até mesmo respondíamos às mesmas, a fim de que os estudantes pudessem progredir em outros aspectos da investigação.

Os participantes do estudo-piloto trabalharam com as atividades experimentais em um grupo único. No primeiro encontro, havia quatro estudantes presentes, e no segundo, dois estudantes se juntaram aos primeiros, em um total de seis participantes. Nessa etapa, optamos pela geração de dados a partir da gravação em áudio das situações de pesquisa. Para fins de redundância, fizemos as gravações utilizando dois microfones de pequeno tamanho e um microfone adicional em um aparelho celular.

6.1.1. Análise do estudo-piloto e alterações na metodologia

A principal função do nosso estudo-piloto, como descrito no item anterior, era o teste da metodologia de geração de dados. Após a aplicação, algumas alterações metodológicas foram introduzidas. Essa análise prévia foi elaborada a partir da escuta dos áudios dos dois encontros e das atividades escritas da pesquisa, buscando

principalmente identificar quais pontos dos protocolos de investigação haviam sido mal interpretados pelos participantes.

A primeira constatação se relacionou com a absoluta necessidade da visita de campo. A nosso ver, a apresentação de fotografias das estruturas arquitetônicas aos participantes da pesquisa não se revelou frutífera, pois embora ela tenha permitido que os estudantes pudessem ter contato com alguns dos fenômenos ópticos a serem discutidos, acreditamos que ela limitou os questionamentos que os próprios alunos poderiam vir a fazer acerca da reflexão nas estruturas caso estivessem observando as mesmas *in loco*. Apesar do exposto, não vemos o fato da não ocorrência da visita de campo durante o estudo-piloto como prejudicial à construção dos protocolos de pesquisa definitivos, justamente pelo caráter de teste da metodologia que atribuímos ao estudo-piloto.

A análise do estudo-piloto introduziu ainda outra alteração na metodologia, relacionada ao tempo destinado às atividades experimentais. Acreditávamos que um único encontro seria suficiente para trabalhar com as três atividades experimentais desenvolvidas. Entretanto, já no primeiro encontro com o grupo do estudo-piloto tal impossibilidade foi demonstrada. Apenas duas atividades foram trabalhadas, sendo que a segunda recebeu consideravelmente menor atenção do que a primeira. Assim, consideramos que seria necessário para a concepção original da pesquisa um mínimo de três encontros, com tempo estimado entre 60 a 90 minutos cada, apenas para as atividades experimentais. Esse fato nos levou a ter que limitar nossas ambições; assim, ao invés de trabalharmos com três sítios arquitetônicos, deveríamos selecionar apenas um deles para a fase seguinte da pesquisa. Pelas razões expostas na apresentação dessa tese, o complexo da PGR foi o escolhido.

Acreditamos ainda que o diálogo inicial, no qual buscamos identificar o conhecimento prévio dos estudantes, não foi conduzido a contento. Os participantes do estudo-piloto possuíam um razoável intervalo entre o último contato com a Óptica e o desenvolvimento da pesquisa, estimado entre três e cinco anos. Assim, acreditamos que, para fazer emergir os conhecimentos dos alunos, seria necessário dedicar maior tempo a tal etapa. Encaramos então que a visita de campo poderia se revelar o momento ideal para tal, mas decidimos pela inclusão adicional de um questionário virtual (ver Apêndice D) que foi respondido pelos participantes da pesquisa definitiva algumas semanas após a visita, logo antes da atividade experimental.

Algumas das tarefas propostas a partir das atividades experimentais envolviam a produção de desenhos ou esquemas, os quais foram recolhidos por nós. Ao analisar essas produções, percebemos que os critérios usados pelos estudantes nas suas construções não poderiam ser inferidos apenas a partir dos desenhos. Assim, decidimos pela inclusão de tarefas adicionais: ao produzir um esquema, o participante da pesquisa deveria explicar por escrito quais critérios ou conceitos ele havia utilizado para a construção do mesmo.

Notamos também que os participantes do estudo-piloto não compreenderam nosso pedido de construção de esquemas geométricos que representassem os fenômenos observados. Esperávamos que eles fossem capazes de utilizar o modelo geométrico dos raios de luz, tradicional nas aulas de Óptica, mas nenhum dos participantes do estudo-piloto conseguiu fazê-lo. Acreditamos que, em parte, tal dificuldade se deveu à má identificação do conhecimento prévio. Deveríamos ter fornecido um suporte inicial, na forma de exemplos de tais construções, a fim de que a tarefa se tornasse mais clara. Na metodologia revisada para a fase seguinte, tais exemplos estiveram presentes, para que não corrésemos o risco de os alunos do Ensino Médio apresentarem as mesmas dificuldades que os participantes do estudo-piloto em tais construções geométricas.

A análise prévia revelou também que algumas perguntas dos roteiros apresentavam dubiedade, enquanto alguns questionamentos eram redundantes. Assim, tornou-se premente uma revisão criteriosa de tais roteiros, para melhor qualidade na geração de dados. Percebemos, por exemplo, a dubiedade no nosso uso da expressão “raios de luz”, a qual era usada também como sinônimo de prolongamentos dos mesmos, um erro conceitual nosso que poderia induzir o participante ao erro. Buscamos corrigir tal imprecisão na metodologia usada na fase definitiva da pesquisa.

A atividade experimental a partir do modelo da PGR previa que o aluno construísse de forma geométrica a curva cáustica, a partir de uma fotografia aérea de edifícios cilíndricos convexos. Percebemos que apresentar a cáustica em um espelho côncavo poderia facilitar tanto a produção quanto a compreensão da construção geométrica requerida. Assim, incluímos uma demonstração experimental, feita com a própria maquete, durante a aplicação da metodologia no estudo-piloto, a qual foi mantida quando da aplicação das próximas fases da pesquisa.

O desenvolvimento de uma nova percepção sobre a cidade é uma das intenções primárias da nossa pesquisa. Assim, cabe ressaltar que, mesmo na ausência da visita de campo, o estudo-piloto revelou que os participantes apreciaram esse olhar diferenciado

que a Óptica trouxe sobre a cidade, relatando que não observariam, após a atividade, os edifícios discutidos da mesma forma.

6.2. Pesquisa definitiva

A segunda etapa de investigação foi realizada em uma escola particular de Ensino Médio de Brasília, localizada na área central (Plano Piloto), onde exercíamos nossa atividade profissional em 2016, ano de realização da pesquisa. A escola possuía um total de vinte e duas turmas de Ensino Médio, divididas nas três séries. Em média, havia cerca de quarenta estudantes por sala, perfazendo um total aproximado de novecentos alunos.

A direção da escola foi consultada sobre a possibilidade de realizarmos a pesquisa no próprio âmbito escolar, usando as dependências da instituição, em especial o laboratório de Física. Esse espaço pedagógico era um laboratório tradicional, com boa variedade e qualidade de aparelhagens, sendo composto de dez amplas bancadas, favoráveis ao desenvolvimento das atividades experimentais que esperávamos desenvolver com os estudantes. A direção foi receptiva à nossa solicitação, mas ressaltou a impossibilidade de se conseguir autorização de todos os pais dos estudantes de uma turma para a pesquisa, fato que dificultaria ou mesmo impossibilitaria a condução das atividades.

Assim, o corpo diretivo sugeriu que a pesquisa fosse realizada no contraturno (tarde) ou nos sábados pela manhã, horários nos quais os estudantes não estariam envolvidos com as atividades formais da escola. Essa sugestão direcionou nossa pesquisa para um conjunto mais enxuto de estudantes, fato que consideramos como não preocupante e até desejável, pois isso diminuiu os custos da pesquisa (os quais foram associados principalmente à construção da maquete representativa da PGR e ao aluguel do transporte para a visita de campo) e permitiu que a análise qualitativa dos discursos dos participantes pudesse ser mais minuciosa.

Para a seleção de participantes da pesquisa, comunicamos em algumas salas de aula do segundo ano com as quais trabalhávamos sobre o trabalho de pesquisa que estávamos desenvolvendo para o doutorado (aprendizagem da Óptica a partir de estruturas arquitetônicas) e convidamos os eventuais voluntários a nos procurar para maiores detalhes. Uma vez que o voluntário manifestasse interesse e disposição

(especialmente tempo livre) para participar da pesquisa, era entregue ao mesmo um termo de consentimento livre e esclarecido (Apêndice E).

Todos os voluntários envolvidos na pesquisa eram adolescentes, com idades entre quinze e dezessete anos. Assim, tornou-se necessário enviar o termo de consentimento livre e esclarecido (autorização de pesquisa) também para os pais ou responsáveis legais. Frisamos, entretanto, que os estudantes também assinaram o formulário, pois acreditamos que a decisão primeira devia emanar do próprio participante da pesquisa (ainda que não soberana perante a legislação) e, portanto, devia estar manifesta, a fim de estabelecer uma ligação mais formal para com a pesquisa.

Treze estudantes se apresentaram como voluntários, sendo cinco mulheres e oito homens. Três meninas, entretanto, desistiram de participar ainda antes da visita de campo, e nem mesmo devolveram os termos de consentimento ²¹. Os dez estudantes restantes formaram o grupo de participantes da pesquisa. A visita de campo foi realizada com o grupo integral, enquanto para as atividades no laboratório, foram formados quatro grupos (dois trios e duas duplas).

Torna-se inevitável admitir que o grupo de participantes da pesquisa apresentava interesse por Física e disciplinas afins, sendo composto principalmente por alunos com bom rendimento escolar. Longe de considerarmos que tal fato tornou nossa amostra “viciada”, encaramos que havia uma motivação intrínseca dos estudantes para a participação na pesquisa, condição que defendemos como facilitadora da aprendizagem. Frisa-se que tentamos estimular alunos com diferentes perfis a se voluntariarem, mas não tínhamos como induzi-los demais, na medida em que a atividade não fazia parte da programação curricular regular da escola e poderia até mesmo se revelar um comportamento antiético da nossa parte.

A pesquisa foi realizada ao longo dos meses de setembro e novembro de 2016, e se iniciou antes mesmo da etapa de qualificação dessa tese, com a realização da visita de campo aos três sítios arquitetônicos no final de setembro. A razão pela qual esse início precoce se fez necessário foi logística, pois tínhamos preferência por realizar a visita aos sítios arquitetônicos durante a época de seca brasiliense, devido ao céu sem nuvens e à baixa possibilidade de chuva. No caso de chuva, tínhamos receio que a saída de campo

²¹ Em conversa posterior, as estudantes nos disseram que haviam desistido de participar da pesquisa porque tinham que estudar para as avaliações regulares da escola.

se revelasse desinteressante, pois a observação dos fenômenos ópticos poderia ser prejudicada.

Os princípios de reflexão da Óptica Geométrica já haviam sido apresentados de maneira formal aos estudantes no semestre anterior daquele mesmo ano, entre fevereiro e março. O livro-texto utilizado em sala de aula à época era a obra de Bonjorno *et al.* (2010), livro pelo qual não exibimos preferência pessoal, mas que foi adotado por ser o único dentre as possibilidades oferecidas pela instituição que se adaptava aos conteúdos abordados no processo seletivo da Universidade de Brasília (UnB), o Programa de Avaliação Seriada (PAS).

Devido a essa apresentação formal prévia, temas como as leis da reflexão luminosa, os tipos de reflexão (difusa e especular), as formas usuais de espelhos (plano, côncavo e convexo), as diferentes imagens conjugadas pelos mesmos e os modelos geométricos e algébricos já tinham sido trabalhados em sala de aula. Frisa-se, entretanto, que tomamos o cuidado de não mencionar durante tal exposição nenhuma relação com obras arquitetônicas, pois nossa intenção era desenvolver a pesquisa ao longo daquele ano, e desejávamos que as atividades elaboradas fossem percebidas pelos estudantes como “novidades”, para fins de motivação.

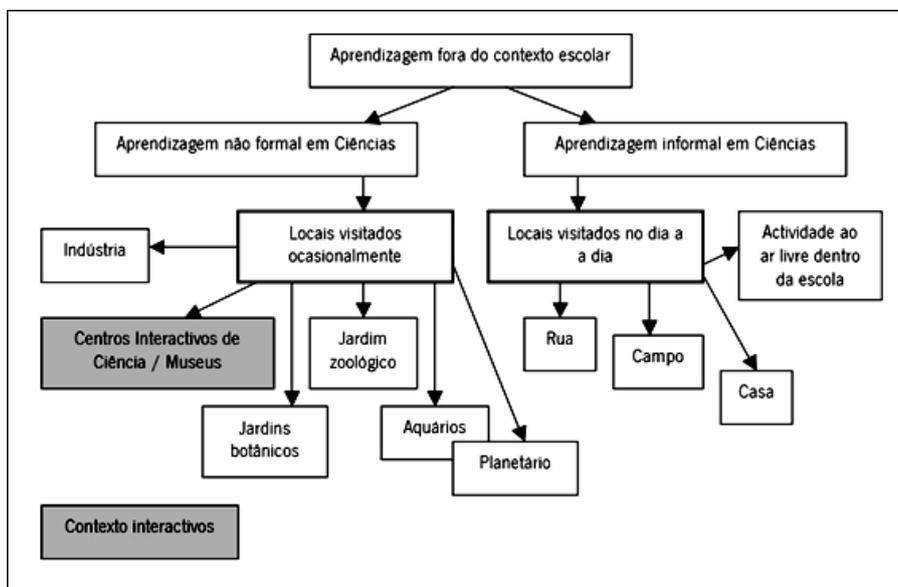
6.2.1. Visita de campo

Como relatamos, as respostas que obtivemos no estudo-piloto levaram à imperativa necessidade de realização de uma visita de campo aos prédios da PGR, em especial pelos diferenciais de aprendizagem que essas visitas proporcionam. Oliveira (2008) defende que as visitas de campo estabelecem novas relações entre a escola e o meio exterior, permitem a prática da cidadania e o desenvolvimento da autoestima e possibilitam que o próprio estudante realize suas interpretações sobre o ambiente, aprendendo a apreciá-lo através da descoberta.

Segundo a autora supracitada, a aprendizagem pode se dar em contextos formais, não formais e informais. Pode-se entender como contexto formal aquele propiciado por escolas e instituições de ensino regulares; o contexto não formal envolve uma visita ocasional ao ambiente (como jardins zoológicos ou museus) e o contexto informal é aquele visitado no dia-a-dia (casa, rua, pátio da escola). Entretanto, ainda segundo a autora, a diferenciação entre contexto não formal e informal não é tão simples e dependente apenas do local, sendo dependente da presença ou não de planejamento

prévio e estruturação (não formal) ou por ser um processo dinâmico e imprevisível por natureza, condicionado pelos imprevistos do dia-a-dia (informal). A figura 22 apresenta um quadro para a diferenciação desses contextos.

Figura 22. Contextos de aprendizagem não formal e informal no Ensino de Ciências.



Fonte: Oliveira (2008), p. 6.

Admitimos, portanto, uma dificuldade inicial em classificar a visita aos sítios arquitetônicos brasileiros de interesse como um contexto de aprendizagem não formal ou informal. Por um lado, havia uma preocupação em estruturar a visita e orientar os estudantes quanto à adequada observação dos fenômenos ópticos nas edificações escolhidas; por outro, a atividade era por natureza dinâmica e até mesmo suscetível às intempéries – em especial, a baixa umidade brasileira, a qual obrigou a uma “parada estratégica” para reidratação e alimentação. Após a realização da visita, percebemos que terminamos por buscar um contexto mais informal, na medida em que os questionamentos e colocações dos estudantes ocorreram de maneira bastante natural e espontânea.

Da Ros (2012) ressalta também que as visitas de campo geram uma maior valorização da disciplina por parte dos estudantes, oportunizam um maior contato com a realidade, articulam a teoria e a prática, permitem a discussão das situações concretas observadas e sensibilizam os estudantes para os problemas que extrapolam a sala de aula. Assim, conjecturamos que os estudantes não dariam tanta atenção aos fenômenos refletivos presentes nos sítios arquitetônicos caso não estivessem participando da visita

de campo. Acreditamos, ademais, que se os estudantes visitassem as edificações da PGR em momento externo à situação de aprendizagem proposta, as fotografias que eles captariam provavelmente não dariam ênfase aos fenômenos ópticos apresentados nesses edifícios.

Para o deslocamento até a PGR, um transporte com motorista profissional foi alugado com nossos próprios recursos. A visita teve duração aproximada de duas horas e meia e se iniciou a partir da própria escola. Tivemos sorte: o dia escolhido, um sábado pela manhã, estava com um belo céu azul sem nuvens. Ao longo da visita, percebemos que os estudantes já possuíam familiaridade com a cidade e suas obras arquitetônicas, pois a escola se encontra próxima a tais obras e os prédios escolhidos são marcantes na paisagem urbana brasiliense.

Cabe frisar que não apenas a PGR foi visitada, pois nossa pretensão original antes da qualificação envolvia o trabalho a partir de três sítios arquitetônicos. Assim, o trajeto incluiu com uma parada na Procuradoria Geral da República, prosseguindo a seguir para o Setor Bancário Sul (quando fizemos a mencionada “pausa para reidratação”) e terminando no Palácio Itamaraty, retornando então à escola (figura 23).

Figura 23. Mapa de parte da área central de Brasília. As áreas tracejadas indicam a localização dos três sítios arquitetônicos escolhidos para a visita de campo: A) Setor Bancário Sul; B) Palácio do Itamaraty; e C) Procuradoria Geral da República. As áreas em azul representam espelhos d’água e as áreas verdes são gramados e bosques.



Fonte: figura adaptada a partir de original disponível em <<https://www.google.com.br/maps/@-15.801441,-47.8716844,15.25z>>. Acesso: 07/03/2018.

Acreditamos que essas observações adicionais em outros sítios durante a visita não prejudicaram os estudantes, pelo contrário. Ao permitir que eles tivessem contato com outras estruturas arquitetônicas, criamos um maior número de possibilidades de observação de fenômenos ópticos, ainda que tenhamos nos concentrado apenas nos prédios da PGR quando da aplicação das atividades no laboratório.

Nossa intenção original era iniciar a visita na PGR e caminharmos até a Praça dos Três Poderes (na figura 19, esta praça fica próxima à maior área em azul, que corresponde ao espelho d'água do Congresso Nacional), onde se encontram as sedes dos poderes da República. Depois, passearíamos ao largo do Eixo Monumental pela Esplanada dos Ministérios (onde se encontra o Itamaraty) até a estação Rodoviária, onde ocorre a junção com o Eixo Rodoviário. Por fim, caminharíamos ao largo das marginais dessa via até o Setor Bancário Sul.

Essa intenção rapidamente se dissipou, pois embora as chances de observação de fenômenos refletivos nos exemplares arquitetônicos brasilienses fossem múltiplas nessa caminhada e contribuíssem para aquilo que Gehl (2013) chama de *viver a cidade*, ela seria extenuante para pessoas sedentárias como nós (e até mesmo para os estudantes, pois Brasília é um clássico exemplo de urbanismo com características rodoviárias), perfazendo mais de seis quilômetros. Com o uso da *van* para os deslocamentos intermediários, os estudantes não exibiram sinais de cansaço durante a visita.

Na nossa percepção, as visitas aos sítios arquitetônicos tiveram como finalidade uma primeira familiarização dos participantes da pesquisa com as estruturas que seriam trabalhadas em laboratório na etapa seguinte. Outra finalidade que atribuímos à visita era o registro das opiniões e percepções dos participantes da pesquisa sobre as estruturas visitadas e sua relação com a Óptica, a partir da observação *in loco* dos fenômenos. Não consideramos, portanto, que objetivos de aprendizagem específicos nessa fase da pesquisa precisassem ser estipulados e buscamos colher as impressões dos estudantes sobre as fachadas dos edifícios a partir de um diálogo não previamente estruturado.

Nessa tônica, os participantes da pesquisa foram estimulados a fotografar as estruturas arquitetônicas usando seus celulares pessoais, e ressaltamos que eles fizessem um esforço para que as fotos representassem os fenômenos ópticos ou físicos que eles percebessem em cada estrutura – ou seja, o “comando” da atividade era a identificação de fenômenos como a formação de imagens ou reflexões múltiplas nas fotografias.

As fotografias obtidas foram então compiladas por nós através da rede social *Whatsapp*, corroborando para a complementaridade metodológica defendida por Flick (2009). Os estudantes enviaram as fotos que consideraram mais significativas. Apesar de termos pedido que cada foto fosse seguida de uma breve menção a qual fenômeno estava sendo observado, nenhum dos participantes enviou tais respostas. Acreditamos que essa ausência de explicações se deveu ao fato de pedirmos um grupo de fotografias, e não apenas aquela que eles considerassem mais significativa. Foi perceptível, entretanto, que os estudantes não buscaram apenas retratar os fenômenos ópticos nas fotos: houve uma busca por estética, pelo melhor ângulo de visão que exibisse aquilo que eles percebiam como significativo.

Durante a visita, adotamos o procedimento metodológico de geração de dados através das notas de campo, registrando os comportamentos e as colocações textuais dos estudantes que consideramos mais relevantes. Não acreditávamos que a gravação de áudio ou vídeo fosse adequada aqui, pois esperávamos que os estudantes se dispersassem ao redor das estruturas prediais, fato que dificultaria a captação eletrônica de som e imagem. Essa intuição se confirmou, sendo que por vezes fomos obrigados a “ir atrás” de estudantes que se afastaram por demais do grupo.

Ao longo da visita, pudemos perceber que os estudantes associavam o nome de Oscar Niemeyer a quase toda a Arquitetura de Brasília, mesmo no caso de obras que não são de sua autoria, tais como os edifícios-sede do Banco Central e da Caixa Econômica. Apesar disso, eles demonstraram algum conhecimento sobre a história da arte e Arquitetura brasiliense – associando corretamente, por exemplo, o nome do escultor Bruno Giorgi à escultura *Meteoro* que adorna o espelho d’água do Itamaraty e destacando a originalidade dos prédios brasilienses em relação aos presentes em outras cidades da América do Sul, como São Paulo, Rio de Janeiro, Buenos Aires e Santiago.

Em termos de observação de fenômenos ópticos, nossa intervenção foi menor que a esperada. Foram poucas as situações em que tivemos que direcionar a atenção dos alunos para um fenômeno específico. Os próprios participantes perceberam, por exemplo, a necessidade de mudança de posição (sentando-se ou deitando no chão, andando lateral ou longitudinalmente, abaixando e levantando a cabeça) para a observação de um maior número de imagens na PGR, de imagens de prédios diversos em uma mesma fachada ou para a melhoria da nitidez da imagem, no caso do espelho d’água do Itamaraty. Nessa última situação, aproveitamos para discutir a consideração de que uma reflexão especular é, na verdade, um caso limite da reflexão difusa, quando

o ângulo de incidência é quase rasante ²². A forma mais comum para se obter esse efeito, em um espelho d'água, é aproximar os olhos da superfície.

Os próprios estudantes conduziram observações inusitadas ou mesmo práticas experimentais espontâneas durante a visita, por vezes percebendo fenômenos que não havíamos antevisto. No sítio da PGR, por exemplo, alguns alunos perceberam que a grande distância entre eles e os prédios permitia que fossem ouvidos ecos de gritos. Os estudantes também tentaram “alinhar” o Sol com flores ou a tampa de uma garrafa térmica, informando que estavam testando a propagação retilínea da luz. Aliás, um dos participantes, ao nos mostrar a “invasão” da luz nas bordas do objeto em uma foto, nos disse que tinha “derrubado o princípio da propagação retilínea da luz”. Citações a outros fenômenos como a interferência das ondas na água, a refração da luz nas janelas da PGR, a reflexão do céu azul pelas janelas espelhadas dos edifícios ou a comparação entre garrafas e lixeiras espelhadas com os prédios da PGR também foram espontâneas.

Nossa escolha de data (final de setembro) e horário (meio da manhã) para a visita se revelou bastante acertada no caso da PGR, pois foi possível observar faixas luminosas divergentes no gramado que cerca os edifícios (figura 24).

Figura 24. Faixas de luz no gramado da PGR observadas durante a visita de campo.



Fonte: fotografia do autor (2016).

Tais faixas resultam da divergência da luz após reflexão na superfície espelhada cilíndrica resultante da associação das janelas dos edifícios. A construção da curva

²² Para maiores detalhes sobre a dependência do ângulo de incidência com a reflexão difusa e a especular, ver o artigo de Fakhruddin (2007).

cáustica a partir de tais faixas fazia parte das atividades experimentais posteriores, por isso consideramos tão importante sua observação direta por parte dos estudantes. Aliás, percebemos nesse ponto a necessidade de diferenciar para os estudantes o formato do prédio como um todo (espelho convexo) e das janelas (espelho plano).

A interação diferenciada com o ambiente urbano, que tínhamos também como objetivo da visita, foi bastante satisfatória. Não apenas os estudantes puderam perceber os fenômenos ópticos *in loco* nas edificações visitadas, mas também puderam vivenciar situações típicas do ambiente urbano durante a visita, em contraponto com a aula tradicional.

A título de exemplo, em situações formais de aprendizagem, não seria provável comprar picolés de um vendedor ambulante, perceber que um dos edifícios da PGR era sustentado por tirantes “tal qual uma marionete” (frase de uma estudante), descobrir que o prédio do extinto Ministério da Pesca estava disponível para locação, fotografar a si mesmo junto a estruturas turísticas tradicionais e ao lado de grafites urbanos, lembrar-se do Itamaraty em chamas durante as manifestações de 2013, perceber que o carro de transporte não poderia ficar estacionado à frente do edifício por obstruir o horizonte livre brasiliense (conforme nos informou o soldado que guardava a entrada do Itamaraty) ou, por fim, desvendar o mistério sobre a enorme fila no Conjunto Cultural da Caixa, a qual se devia não à exposição de artes visuais no museu, mas sim à compra de ingressos para um espetáculo de Daniela Mercury.

Cabe ainda frisar que, apesar da clara importância que a visita de campo teve na nossa proposta didática, não entendemos que essa técnica pedagógica é superior às práticas experimentais realizada em um laboratório tradicional. Na realidade, entendemos as duas práticas como formas diferentes de experimentação, em consonância com as ideias defendidas por Silva *et al.* (2010).

6.2.2. Questionário prévio

Como relatamos anteriormente, os estudantes haviam tido contato com a Óptica Geométrica alguns meses antes da realização da pesquisa. Apesar disso, decidimos incluir um questionário virtual (Apêndice D) prévio às atividades experimentais, com fins de identificar se os participantes já tinham familiaridade com os temas que interessaram durante a visita de campo e também com aqueles que seriam trabalhados nas atividades experimentais.

O questionário foi elaborado usando o *Google Forms*. Uma intenção que tivemos em mente ao elaborar esse questionário foi identificar, de forma prévia às atividades experimentais, se algum tema se apresentava como um entrave à aprendizagem, em consonância com o nosso primeiro objetivo específico.

Na véspera da realização da atividade experimental, foi organizada uma tarefa para os subgrupos (os dez alunos foram divididos em dois trios e duas duplas para essas fases posteriores). O trabalho a ser desenvolvido pelos participantes, nesse caso, era responder ao questionário virtual no qual buscamos identificar se os conhecimentos que considerávamos relevantes à aprendizagem na etapa seguinte da pesquisa já se encontravam presentes. A partir da nossa experiência profissional no ensino médio, percebemos que o estudante deveria conhecer, de forma prévia à atividade experimental, o conceito e a representação de raios de luz, a igualdade entre o ângulo de reflexão e incidência, a diferenciação entre espelhos esféricos côncavos e convexos e o reconhecimento de espelhos cilíndricos convexos.

As cinco primeiras questões do formulário são de múltipla escolha e se referem a um diagrama clássico de raios de luz, mostrando a formação da imagem de um objeto pontual em um espelho plano. Nossa preocupação nessas questões era verificar se os estudantes conheciam os conceitos de objeto, imagem, raio de luz e prolongamento de raio de luz, e se eram capazes de diferenciá-los no esquema. Na oitava questão, investigamos com maior profundidade o conceito de imagem virtual, pedindo ao estudante que entre seis opções, ele escolhesse todas aquelas que contivessem características dessa imagem. Como a imagem formada em um espelho cilíndrico convexo, como os prédios da PGR, tem natureza virtual, acreditamos que a investigação desse pré-requisito era importante.

A sexta questão, também de múltipla escolha, é numérica e lida com a Segunda Lei da Reflexão (igualdade dos ângulos de incidência e reflexão em relação à reta normal). Como esse princípio é fundamental no entendimento da reflexão luminosa, decidimos que era necessário verificar se os estudantes o conheciam.

Já na sétima questão, um lago tranquilo e cinco prédios com fachadas espelhadas são apresentados, e o estudante deveria escolher todas as imagens equivalentes a um espelho plano. Esse questionamento é importante para identificar se os estudantes conseguiam discernir entre superfícies planas, côncavas ou convexas. A identificação do formato dos espelhos também está presente na nona e décima questões, no formato múltipla escolha.

Todos os participantes responderam ao questionário, ainda que alguns o tenham feito no momento imediatamente anterior às atividades experimentais, quando indagamos se eles já haviam respondido ao formulário.

Após termos acesso às respostas, conduzimos uma discussão com cada grupo de estudantes acerca das respostas, antes da realização das atividades experimentais. Verificamos que todos os participantes acertaram as questões 1, 2, 3, 9 e 10. Já nas questões 4 e 5, oito estudantes tiveram concordância com a resposta correta, indicando que dois alunos confundiram o raio de luz com o seu prolongamento. Fizemos então uma explicação acerca dessa diferença.

A sexta questão teve marcação incorreta por três alunos, os quais confundiram quais ângulos deveriam ser somados (ou seja, não associaram corretamente a imagem ao enunciado). Resolvemos a questão no quadro para sanar as dúvidas. Já na sétima questão, as respostas corretas eram as imagens A, B e E, as quais correspondem a superfícies refletoras planas. Os alunos tiveram a integralidade de acertos nos itens A e E, mas apenas sete deles marcaram a letra B. Ao serem questionados do porquê, aqueles que erraram a questão responderam que a fachada do prédio em questão correspondia a *dois* espelhos planos e não apenas a *um* espelho, como o comando da questão pedia. Ou seja, houve uma confusão de ordem apenas morfológica (interpretação de um artigo como um numeral).

Ainda na sétima questão, metade dos alunos marcou o item C (sede do TST, mostrada na figura 3) como um espelho plano, quando na verdade a fachada é côncava. A razão apontada foi o fato das janelas serem planas, apesar da combinação das mesmas formar uma superfície curva.

A oitava questão, acerca das propriedades de uma imagem virtual, teve a maior dispersão nas respostas. Todos os alunos concordaram que tal imagem se forma atrás do espelho, mas três deles consideraram a imagem invertida, quando na realidade a imagem é direita. Essa é uma explicação errônea tradicional em aulas de Óptica: a imagem é reversa (ou seja, enantiomorfa) e não invertida. Intervimos e explicamos a diferença entre tais características. Ainda nessa questão, houve confusão acerca dessa imagem ser geometricamente obtida pelo encontro de raios ou prolongamentos, em consonância com as respostas incorretas nas questões 4 e 5.

Acreditamos que essa intervenção prévia às atividades experimentais a partir das respostas ao questionário foi bem sucedida, por ter dirimido eventuais dúvidas que os participantes ainda possuísem sobre os princípios da reflexão e também por ter

apontado alguns problemas conceituais que poderíamos nos concentrar nas fases posteriores da pesquisa.

6.2.3. Atividades experimentais

A quarta etapa da pesquisa foi a manipulação da maquete representativa do sítio arquitetônico da PGR pelos participantes da pesquisa, no âmbito de um laboratório tradicional de Física. Para tal, utilizamos o protocolo de investigação disponível no Apêndice C, o qual, como já dissemos, foi desenvolvido no molde de um “roteiro de laboratório”, ou seja, uma sequência de atividades de cunho prático ou teórico a serem realizadas a partir da maquete ou com o auxílio da mesma.

Usamos a expressão “roteiro” propositalmente entre aspas, pois os roteiros clássicos de atividades experimentais não estimulam – ou mesmo permitem – investigações espontâneas realizadas pelos estudantes, enquanto nossos questionamentos tinham tais estímulos em vista. Assim, ao invés de elaborarmos relatórios tradicionais a serem preenchidos pelos estudantes durante as atividades práticas, preferimos estabelecer uma estratégia de questionamento semiestruturada, a qual nomeamos *protocolo aprender/ensinar*.

Ao elaborarmos o protocolo, tivemos em mente o primeiro objetivo geral dessa pesquisa, *i.e.*, buscamos incorporar indagações sobre as estruturas arquitetônicas ou as maquetes que trouxessem possibilidades para favorecer a aprendizagem do tema da reflexão luminosa. Para tal, usamos as propostas presentes em dois artigos prévios nossos (RIBEIRO, 2015c; RIBEIRO, 2016e), publicados em revistas voltadas para o Ensino de Física, nos quais apresentamos atividades experimentais inspiradas por estruturas arquitetônicas.

A principal vantagem de trabalhar a partir de um estratégia de questionamento semiestruturada diz respeito às questões adicionais, as quais podem emanar do próprio grupo de alunos e serem também investigadas. Optamos, portanto, por um trabalho desenvolvido pelos próprios participantes, a partir do contato direto com o aparato instrumental (maquete) e as questões presentes no protocolo foram idealizadas tendo-se como alvo o desenvolvimento de investigações pelos próprios estudantes sobre os princípios e aplicações da reflexão luminosa. Esse trabalho experimental foi realizado por quatro subgrupos (duas duplas e dois trios), com a intervenção ativa do professor ao longo do processo - daí os protocolos serem intitulados *aprender/ensinar*.

Consideramos essa metodologia de investigação como a mais adequada aos propósitos dessa pesquisa, pois os papéis de pesquisador e professor puderam sofrer superposições, permitindo a interação com os participantes da pesquisa, em consonância com os princípios da aprendizagem colaborativa. Uma geração de dados mais observacional, com o professor removido da situação de aprendizagem, não nos pareceu conveniente, na medida em que esperávamos maior riqueza e qualidade dos dados com a nossa presença durante o processo de investigação.

Fizemos o registro dos encontros apenas em áudio, ao invés do vídeo, por considerarmos que a presença de uma câmera de vídeo traria inevitáveis indiscrições e inibição dos participantes, assim como inconvenientes logísticos como a escolha do posicionamento da câmera, foco manual ou automático, nível de detalhamento fechado ou panorâmico, entre outros. A nosso ver, tais problemas terminariam por dificultar a geração de dados. Para fins de redundância, fizemos as gravações utilizando um microfone de pequeno tamanho ligado a um computador e um aparelho celular.

Para Flick (2009), a principal vantagem do uso de equipamentos para gravação é tornar a documentação de dados independente das perspectivas, tanto do pesquisador e dos sujeitos em estudo. Acreditamos ainda que a familiaridade dos entrevistados com as aparelhagens de gravação (computador e celular) colaborou para a naturalidade na geração de dados. Assim, o principal problema de aplicação metodológica - a presença do gravador – não nos pareceu preocupante. A perda de anonimato, característica também presente em gravações de vídeo, também não foi uma fonte de consternação.

Nessa etapa da pesquisa, tivemos um total de quatro encontros, um para cada subgrupo de participantes, realizados entre os dias 7 e 11 de novembro de 2016, às tardes (exceto na quarta-feira, quando os estudantes tinham avaliações escolares regulares). O áudio de cada encontro foi gravado e posteriormente transcrito em texto, uma prática tradicional para geração de dados para análise qualitativa. Embora a transcrição inicial não tenha sido feita por nós, fizemos uma escuta adicional para complementar ou corrigir pontos onde o texto divergia do áudio, após a geração do texto preliminar.

Para garantia da anonimidade, os nomes reais dos estudantes foram substituídos por pseudônimos, os quais se referem a autores da literatura brasileira do século XX²³.

²³ Os dez pseudônimos escolhidos foram Carlos, Cecília, Clarice, Érico, Fernando, Jorge, Luís, Manuel, Raul e Vinícius.

Os temas específicos da Óptica a serem trabalhados durante as atividades experimentais formaram a essência do protocolo de pesquisa. Os temas foram o conceito de imagem real em contraponto à imagem virtual, a cáustica de reflexão em espelhos côncavos e convexos, o conceito de foco em uma superfície refletora curva, a formação de imagens múltiplas, a diferença entre raios de luz e prolongamentos e o astigmatismo em superfícies cilíndricas.

Assim, o protocolo definitivo se compôs de vinte e nove questionamentos ou atividades a serem desenvolvidas pelos estudantes. As perguntas 2, 25 e 29 se referem de forma mais específica ao primeiro referencial teórico, as Cidades Educadoras. Nessas perguntas, queríamos identificar quais as impressões que a visita de campo e o trabalho experimental tinham produzido sobre os estudantes no tocante à vivência da cidade. Não à toa, a última pergunta do protocolo é se nosso projeto teria contribuído para uma mudança da visão dos estudantes sobre a cidade.

As questões supracitadas foram desenvolvidas por se referirem ao nosso segundo objetivo geral, no qual conjecturamos que nossa proposta poderia levar os estudantes a reinterpretar a cidade sobre um novo olhar, a partir de conceitos da Óptica Geométrica.

A maior parte das perguntas adicionais do protocolo foi dedicada a temas da Óptica em si, conectados à proposta de reconceitualização da atividade experimental. Hodson (1994) nos diz que essa reconceitualização só é possível se a atividade experimental permitir oportunidades para os estudantes testarem suas próprias teorias e construam seus próprios modelos, além de oferecer incentivos adequados para a mudança dessas teorias e modelos.

Podemos entender o protocolo como dividido em três blocos de perguntas (3 a 9; 10 a 18; 19 a 24). Como exemplo de como construímos nossas indagações, consideremos o primeiro bloco. Após identificarmos as percepções iniciais dos estudantes nas perguntas 3, 4 e 5, iniciamos o trabalho com a maquete observando diretamente o que acontece ao colocarmos um longo papel em frente ao cilindro espelhado (pergunta 6), onde uma forte distorção da imagem pode ser observada. As questões seguintes 7 e 8 são questionamentos nos quais o estudante deveria movimentar suas concepções para explicar essa distorção, tecendo hipóteses e fazendo testes diretos com a maquete. Essas hipóteses, após o teste, poderiam vir a ser confirmadas, complementadas, corrigidas ou mesmo descartadas pelo professor. Por fim, na questão 9, o estudante deveria construir um modelo geométrico explicativo.

Essa metodologia de investigação foi repetida nos blocos de questões 10 a 18, onde investigamos como os estudantes percebiam e explicavam a imagem astigmática (deformada) no espelho e a formação das múltiplas imagens. Nesse bloco, seguimos a mesma formulação do anterior: iniciamos com a observação do fenômeno, identificamos as teorias e modelos que os estudantes possuíam sobre os temas, discutimos a validade dos mesmos e terminamos com a construção de modelos geométricos explicativos.

Em seguida, no bloco de questões 19 a 24, trabalhamos com a atividade descrita em um artigo nosso (RIBEIRO, 2016e), no qual os alunos podem construir a curva cáustica a partir de uma foto aérea dos edifícios da PGR e perceber sua relação com o foco de um espelho gaussiano. Nesse bloco, alteramos um pouco a sequência de investigação: iniciamos pela construção geométrica do modelo pelos próprios estudantes, identificando e corrigindo as ideias explicativas logo a seguir.

A nosso ver, as questões que construímos para o protocolo de pesquisa suportam alguns dos nossos objetivos específicos. A partir das falas dos estudantes, por exemplo, foi possível identificar alguns entraves para a compreensão dos fenômenos refletivos (ver capítulo 7, sobre a análise dos dados). Também conjecturamos que as atividades experimentais ou escritas (construção de esquemas, por exemplo), trariam possibilidades de interação espontânea dos estudantes com as maquetes, outro dos nossos objetivos específicos.

Para o terceiro referencial, a aprendizagem colaborativa, não consideramos que deveríamos criar questionamentos específicos. Afinal, o trabalho proposto já ocorria em grupos e com a presença direta do professor, para que as possibilidades de interação na zona de desenvolvimento iminente dos estudantes fossem potencializadas. Ao contrário, acreditamos que todas as questões do protocolo poderiam abrir possibilidades para colaborações entre os próprios estudantes ou deles com o professor, em especial aquelas em que questionamos os estudantes sobre suas explicações para o que estavam observando. Vemos aqui uma consonância metodológica com um dos nossos objetivos específicos: a identificação da aprendizagem colaborativa durante a realização das atividades experimentais.

Incluímos ainda, ao final das atividades, as perguntas 26, 27 e 28, as quais se referem à busca das opiniões dos estudantes sobre o trabalho com as maquetes e a visita de campo, em especial uma comparação entre essas duas práticas pedagógicas. Novamente, essa inclusão se deveu a um dos objetivos específicos da nossa pesquisa, no

qual desejávamos levantar as opiniões dos estudantes sobre uma atividade experimental inspirada por uma estrutura arquitetônica. Em momento posterior, na última semana de aula do ano de 2016, fizemos uma rápida reunião com todos os participantes e fizemos algumas perguntas adicionais sobre a visita de campo e as maquetes.

6.2.4. Questionário posterior

Na etapa de qualificação dessa tese, foi ressaltado que deveríamos nos atentar aos objetivos de aprendizagem (listados mais adiante) que tínhamos para as atividades experimentais desenvolvidas. Buscando atender tal demanda, encerramos a participação de cada subgrupo na pesquisa, logo após as atividades experimentais, com um questionário virtual. Usando novamente o *Google Forms*, disponibilizamos cinco questões objetivas para os participantes, as quais se compunham de exercícios didáticos ou indagações teóricas que lidavam com os conceitos e temas discutidos durante as atividades experimentais. Esse questionário está disponível no Apêndice F.

Cabe ressaltar que a avaliação se tais objetivos de aprendizagem foram alcançados não se deu apenas pela análise das respostas dos participantes a esse questionário posterior, pois a verificação de aprendizagem em alguns objetivos, como aqueles relacionados às construções geométricas, se deu a partir de perguntas específicas presentes no protocolo de investigação.

Os objetivos de aprendizagem das atividades experimentais foram a diferenciação entre superfícies côncavas *vs.* convexas e cilíndricas *vs.* esféricas, a identificação de imagens produzidas por astigmatismo, o entendimento da formação de imagens em superfícies cilíndricas, a construção de imagens por métodos geométricos e a caracterização da curva cáustica e do foco de uma superfície refletora a partir de uma construção geométrica. Assim, elaboramos cinco questões objetivas para identificar se tais objetivos, a princípio, haviam sido atingidos.

Admitimos, todavia, a dificuldade de atribuir à nossa proposta a única razão pela qual os alunos acertaram ou erraram as questões, preocupação constante, por exemplo, em pesquisas que trabalham com o modelo pré-teste e pós-teste, como aquele que usamos na nossa dissertação de mestrado (RIBEIRO, 2012). Ao mesmo tempo, consideramos que a necessidade de alguma verificação pós-situação de aprendizagem era inescapável. Admitimos ainda que não discutimos com os estudantes as respostas que eles deram às questões do formulário.

A primeira questão lidava com a diferenciação entre superfícies côncavas *versus* convexas e cilíndricas *versus* esféricas, a partir da fotografia do Hotel Vdara em Las Vegas (ver figura 11). Todos os estudantes responderam corretamente a essa questão. A segunda questão mostrava uma fotografia da atividade experimental na qual discutimos o astigmatismo em uma superfície cilíndrica. Três estudantes divergiram da resposta correta, considerando que as imagens distorcidas se deviam ao fato da reflexão em um espelho cilíndrico não ser especular, o que não é verdade. Conjecturamos se a atividade de construção da cáustica, a qual envolvia desenhar diversos prolongamentos que terminavam por se espalhar em direções diversas, pode ter levado tais estudantes à confusão entre reflexão especular em uma superfície curva e reflexão difusa.

Na terceira questão, três estudantes também apresentaram divergência do gabarito. A imagem de um objeto pontual em um espelho cilíndrico de eixo vertical, tal como os prédios da PGR ou as lixeiras usadas no laboratório, é uma linha vertical, ideia que foi trabalhada ao longo da atividade. Os três estudantes que divergiram consideraram que tal imagem era uma linha horizontal.

A quarta questão é um exercício didático clássico, envolvendo dois espelhos côncavos e o posicionamento de uma lâmpada no centro de um deles e no foco do outro para que o feixe emergente seja paralelo. Pela nossa experiência pedagógica, já imaginávamos que esse exercício seria difícil para os estudantes, crença que se confirmou: a questão apresentou três respostas diferentes e apenas três alunos marcaram a opção correta. Por fim, apenas um estudante acertou a quinta questão, indicando que a relação entre o foco e a curva cáustica não foi bem compreendida pelos estudantes.

Encerrada a fase de geração preliminar dos dados, partimos para a análise do que foi produzido. As características da pesquisa exigiram uma análise de natureza qualitativa, a qual é descrita no próximo capítulo.

7. ANÁLISE E RESULTADOS

Desde o início da nossa pesquisa, já antevíamos como inevitável que a análise dos dados gerados fosse qualitativa. Moreira (2011) nos diz que a adoção de um paradigma qualitativo implica em tomar como pressuposto que aquilo que se pesquisa não é independente do processo da pesquisa e também em buscar a compreensão de um fenômeno social a partir da interação do pesquisador com os participantes da pesquisa. A nosso ver, a visão de Moreira (2011) pode ser até mesmo ampliada para outros modelos de pesquisa, pois aquilo que se pesquisa nunca é absolutamente independente do processo de investigação. A nosso ver, tais afirmativas podem ser usadas para caracterizar o protocolo aprender/ensinar que usamos para a geração de dados.

Na literatura acadêmica, existem formatos pré-definidos para se analisar dados qualitativos, tais como a análise de discurso ou a análise de conteúdo. Essas técnicas estabelecem algumas regras e passos, desde a gênese da pesquisa, com vistas à validação da metodologia e dos resultados obtidos. Mesmo tais técnicas tradicionais de análise, entretanto, apresentam certa liberdade de ação para o pesquisador: Caregnato e Mutti (2006) nos dizem, por exemplo, que havia ao menos cinquenta e sete variedades de análise de discurso no início do século XXI. Ao tomarmos conhecimento de tal variedade de abordagens, vimos como complexa a tarefa de identificar qual variedade seria mais adequada na nossa pesquisa. Assim, decidimos por um caminho onde não buscaríamos encaixar nossa pesquisa em uma técnica pré-estabelecida de análise.

Nossa pesquisa pode ser entendida como um estudo etnográfico, na forma como Moreira (2011) o define:

Em educação, rigorosamente falando, o que se faz são estudos etnográficos, isto é, uma adaptação da etnografia à educação, uma vez que o fenômeno de interesse da pesquisa educativa é, em última análise, o processo educativo, não uma cultura ou um grupo social em si mesmos. Tais estudos etnográficos incluem, por exemplo, uma sala de aula em particular, um pequeno grupo em uma sala de aula ou em uma escola, cenas ou diálogos na sala de aula, relações escola-comunidade, etc. (MOREIRA, 2011, p.81).

Percebemos que outras características do nosso estudo também são apontadas pelo autor supracitado e auxiliam na sua caracterização como etnografia: nosso papel como pesquisador foi duplo, tanto como participante quanto como observador; houve envolvimento social direto entre nós e os grupos de participantes durante os encontros; nossas intervenções e interações com os estudantes certamente influenciaram os dados

gerados, pois não tínhamos como ser indiferentes ao fenômeno que pesquisávamos (MOREIRA, 2011).

Antes de iniciarmos a codificação em si, decidimos por uma rápida análise preliminar, gerando uma nuvem de palavras a partir das transcrições²⁴ (figura 25). De acordo com Heimerl *et al.* (2014), em tradução nossa:

As nuvens de palavras geradas para um corpo de texto podem servir como ponto de partida para uma análise mais profunda. Por exemplo, elas ajudam a julgar se um dado texto é relevante para uma necessidade específica de informação. [...] As nuvens de palavras são usadas estaticamente como um meio de resumir o texto na maioria dos sistemas e, normalmente, não fornecem ou possuem apenas recursos limitados de interação (HEIMERL *et al.*, 2014, p.1833).

A nuvem de palavras que construímos permite intuir que os conceitos específicos da Óptica Geométrica, como *espelho*, *luz*, *raios*, *imagem*, *foco*, *convexo*, entre outros, ocuparam o centro das falas durante a pesquisa. Ainda assim, houve referências manifestas também a palavras como *prédios*, *cidade*, *maquete*, *visita*, *campo*, *Procuradoria*, entre outros. Isso indica que a relação entre Arquitetura e Óptica também se fez presente no projeto de pesquisa. Assim, partindo do excerto de Heimerl *et al.* (2014), podemos concluir que as transcrições se revelaram adequadas como fontes de informação para a nossa adequada.

Figura 25. Nuvem de palavras elaborada a partir das transcrições dos áudios da pesquisa.



Fonte: imagem construída pelo autor (2019) com a ferramenta gratuita *Word Art*.

²⁴ A nuvem foi gerada após eliminarmos os nomes dos participantes e as palavras de uso muito comum como *sim*, *não*, etc. Palavras como *prédio* e *prédios* foram encaradas como um só vocábulo.

Partimos então para a codificação dos textos, na medida em que a nuvem de palavras era apenas um ponto de partida. Nesse momento imediatamente prévio à codificação, contudo, nossas preocupações com a qualidade da pesquisa se tornaram mais manifestas. Gibbs (2009) nos diz que há três pontos principais a se preocupar nessa busca por qualidade em pesquisas:

Preocupações tradicionais com qualidade sugerem que a pesquisa deve ser válida (captar com precisão o que está acontecendo), confiável (dar resultados coerentes) e generalizável (ser verdadeira para uma ampla variedade de circunstâncias). Entretanto, a aplicação dessas ideias à pesquisa qualitativa é difícil e, segundo alguns, até mesmo inadequada (GIBBS, 2009, p.132).

Concordamos com a ressalva final do autor: conceitos como validade, confiabilidade e generalidade são mais adequados aos tratamentos quantitativos típicos das “ciências duras” como a Física e a Química. Ainda assim, buscamos garantir a validade do nosso trabalho a partir de duas frentes: a validação dos entrevistados e a triangulação. Gibbs (2009) informa que a transcrição dos áudios inevitavelmente traz alguma interpretação prévia dos dados, na medida em que ela é uma forma de tradução de um meio de comunicação para outro. Assim, seguimos a recomendação do autor e buscamos a validação dos próprios estudantes sobre suas falas, em fevereiro de 2017, quando a instituição escolar retornou às aulas (as transcrições foram feitas durante nosso período de férias entre dezembro de 2016 e janeiro de 2017). Nossa intenção era verificar se havia alguma mudança de ideia, se nós havíamos interpretado mal a transcrição, se eles desejavam a retirada de algo que foi dito por constrangimento ou outra causa, ou mesmo se eles não desejavam mais participar da pesquisa.

Quatro participantes disseram não ter interesse em fazer a revisão das transcrições e que confirmavam suas falas originais. Para os demais, reunimos em separado cada um dos grupos com que trabalhamos no laboratório (com a natural ausência dos quatro alunos supracitados) e lemos em conjunto a transcrição. Voltamos nossa atenção principalmente para as passagens em que o áudio tinha ficado muito fraco ou confuso, quando, por exemplo, diversos estudantes falavam ao mesmo tempo. Ainda assim, houve passagens onde não foi possível transcrever aquilo que foi dito, mesmo repassando o áudio para os participantes. Após esse processo, algumas passagens foram retiradas, em especial comentários não apreciativos sobre outros colegas.

Outra recomendação de Gibbs (2009) que temos em mente é a intenção futura de, uma vez publicada nossa tese, oferecer aos participantes um retorno dos nossos

resultados, em especial mostrando como mantivemos a confidencialidade e a privacidade dos participantes.

No tocante à triangulação, além da verificação pelos sujeitos (ou seja, a revisão das transcrições pelos próprios estudantes), conduzimos também uma triangulação de teorias. Moreira (2011, p.106) afirma que essa técnica “consiste em utilizar mais de um esquema teórico na interpretação do fenômeno pesquisado”, isto é, que se tenha em mente que o fenômeno observado pode ser interpretado de diferentes formas. Nossa opção por diversos vieses de análise (cinco no total, como será descrito a seguir), a nosso ver, representa esse processo de triangulação de teorias. Ademais, como utilizamos ao menos dois processos de geração de dados (transcrições e notas de campo), garantimos também uma triangulação metodológica, corroborando para a validade da pesquisa.

Na busca por confiabilidade da análise, buscamos seguir duas outras recomendações de Gibbs (2009). A primeira diz respeito aos erros mais óbvios e grosseiros, por exemplo, como atribuir a um participante a fala de outrem. O autor nos diz que a única solução para esse problema é a contínua revisão e familiarização com os dados. Assim, revisamos as transcrições várias vezes, sendo provável que cada texto tenha sido lido ao menos uma dezena de vezes durante a etapa de codificação, a fim de detectar tais erros grosseiros.

A confiabilidade também está presente no cuidado que tomamos para evitar a inclinação definitiva na codificação. Essa técnica, segundo Gibbs (2009), se compõe em evitar que as primeiras transcrições tenham sido codificadas de forma diferente das últimas que analisamos, quando nossa familiaridade com os códigos já era maior que no início da análise. Assim, terminada a codificação dos textos sob um viés de análise, retornávamos a eles novamente, retirando, inserindo ou modificando a codificação.

No tocante à generalização, concordamos com Moreira (2011) que a pesquisa qualitativa não deve ter como objetivo a descoberta de leis de aplicação universal. Acreditamos que pesquisas como a nossa, desenvolvidas em um ambiente escolar específico, são, no fundo, estudos de caso. Nessa visão, consideramos que a busca pela generalização na área seria mais adequada para metapesquisas ou revisões bibliográficas. Ainda assim, Moreira (2011) nos diz que uma pesquisa qualitativa apresenta características de generalização se ela puder servir como hipótese de trabalho ou subsídio para outros estudos. Daí nossa preocupação em apresentarmos diferentes

vieses de análise, que possam inspirar outros pesquisadores (ou nós mesmos) em pesquisas futuras.

Para a codificação, usamos um *software* pago de análise de dados qualitativos desenvolvido em língua portuguesa, o *webQDA*²⁵. Como os demais softwares nessa linha, o aplicativo lançado em 2010 permite codificar e tratar dados não numéricos, como textos, imagens, vídeos e áudios. Dois diferenciais são ressaltados pelos desenvolvedores do aplicativo e foram confirmados por nós durante essa última etapa da pesquisa: o fato da plataforma ser *online*, acessível a partir de qualquer computador com acesso à internet, e a possibilidade de manter um ambiente de trabalho colaborativo, na medida em que os projetos podem ser compartilhados entre pesquisadores, como entre um doutorando e seu orientador.

A codificação foi feita a partir da leitura atenta e reflexiva das transcrições das nossas notas de campo (feitas durante a visita aos sítios arquitetônicos) e as transcrições dos encontros com os estudantes no laboratório. Nosso *modus operandi* foi escolher um viés de análise (por exemplo, a reconceitualização das atividades experimentais) e ler tais textos à busca de referências a esse viés, categorizando-as em seguida. Como dito acima, após a codificação preliminar, os textos foram relidos e recodificados, a fim de minimizar a inclinação definitiva na codificação. Terminado um viés de análise, partíamos para uma nova releitura do texto, buscando então outra categorização (por exemplo, as situações que identificamos onde houve possibilidades para a aprendizagem colaborativa).

Antes da codificação em si, uma pré-codificação foi elaborada apenas para ligar um estudante às suas falas individuais (tabela 1). Como descrito na metodologia, os alunos participaram da visita de campo como um grupo único, mas foram divididos em quatro grupos menores para o trabalho laboratorial. O grupo 1 foi composto pelos alunos Raul e Érico, o grupo 2 pelos estudantes Cecília, Clarice e Carlos, o grupo 3 pelos alunos Vinícius e Manuel e o grupo 4 pelos estudantes Jorge, Fernando e Luís.

A tabela permite notar que alguns estudantes foram mais “participativos” durante as atividades. Entretanto, percebemos que alguns alunos tiveram um menor número de falas menor porque eles buscavam respostas mais elaboradas (Jorge e Fernando, em especial). Outros ficaram retraídos frente a seus colegas mais falantes, como no caso de Manuel e Vinícius (idem para Carlos e Clarice). Ademais, por vezes as

²⁵ Endereço do aplicativo: <https://www.webqda.net> .

falas correspondiam a monossílabos, em especial as palavras *sim* e *não*. Frisamos que foi comum, durante a codificação, que uma mesma fala tenha sido categorizada mais de uma vez, devido aos diferentes vieses de análise adotados.

Tabela 1. Total de falas dos participantes da pesquisa.

Participante	Falas
Raul	95
Érico	74
Cecília	67
Clarice	105
Carlos	50
Manuel	54
Vinícius	112
Fernando	46
Jorge	35
Luís	51
Total	689

Fonte: tabela construída pelo autor a partir de planilha gerada pelo aplicativo *webQDA*.

Como descrevemos no capítulo anterior, três vieses de análise *a priori* foram estabelecidos a partir dos referenciais teóricos adotados: Cidades Educadoras, reconceitualização das atividades experimentais e aprendizagem colaborativa. A estes, somou-se uma quarta categoria de análise, intitulada *Maquetes e visitas de campo* (quadro 4), a qual inserimos a fim de identificar nas falas dos estudantes as vantagens e desvantagens da visita de campo, assim como as opiniões deles sobre as maquetes usadas nas atividades experimentais.

Ao contrário das categorias *a priori* desenvolvidas a partir dos referenciais, as subcategorias apresentadas no quadro 4 vieram *a posteriori*, a partir das falas dos estudantes. Sobre a visita de campo, os participantes da pesquisa destacaram a conexão entre a teoria e o cotidiano (*Teoria “na prática”*); o fato da aula se dar em um ambiente externo à escola e os aspectos lúdicos inerentes a ela (*Aula não tradicional*); o fato da

visita de campo permitir que o estudante tivesse a possibilidade de interagir com o fenômeno a partir de um ponto de vista “interno” à situação (*Internalidade*).

Quadro 4. Categorias *a posteriori* desenvolvidas sobre maquetes e visita de campo.

Categoria	Descrição
Maquetes e visitas de campo	Comentários dos estudantes sobre as vantagens e desvantagens das práticas pedagógicas adotadas: trabalho laboratorial a partir de maquetes e visita de campo <i>in loco</i> .
Aula não tradicional	A visita de campo ou a maquete são valorizadas por serem ambientes externos à sala de aula tradicional.
Teoria "na prática"	A visita de campo ou o trabalho com a maquete favorece uma conexão entre a teoria formal e o cotidiano
Internalidade	Comentários sobre a visita de campo favorecer a observação e a interação sob um ponto de vista "interno" ao fenômeno.
Externalidade	Comentários sobre a visita de campo favorecer a observação e a interação sob um ponto de vista "externo" ao fenômeno.
Representação	A maquete é entendida como uma representação da realidade em menor escala.
Adequada	A maquete representa bem a realidade.
Inadequada	A maquete não representa bem a realidade.

Fonte: quadro do autor construído a partir de planilha gerada pelo aplicativo *webQDA*.

No tocante às maquetes, os estudantes destacaram o seu papel como representação adequada ou não da realidade (*Representação*); falaram da conexão entre a teoria e a realidade mediada pela atividade experimental (*Teoria “na prática”*); realçaram o laboratório como também um ambiente diferenciado da sala de aula (*Aula não tradicional*); e destacaram a versatilidade da maquete na observação de fenômenos que não seriam possíveis na visita, por serem observadores externos à situação (*Externalidade*).

Por fim, criamos ainda um quinto viés de análise, ligado aos conceitos da Óptica Geométrica trabalhados durante as atividades pedagógicas (quadro 5). A razão para inclusão dessa nova categoria se deveu ao fato de, no âmbito da nossa pesquisa, estar a preocupação em desenvolver atividades nas quais poderíamos apresentar e discutir com os estudantes alguns temas específicos da Óptica Geométrica a partir de exemplares arquitetônicos brasileiros. Não apresentar ao menos uma rápida análise

acerca da aprendizagem de tais conceitos, a nosso ver, pareceria contraproducente, mas frisamos que esse quinto viés de análise não ocupou a centralidade das nossas indagações.

Quadro 5. Categorias *a priori* sobre os conceitos da Óptica Geométrica trabalhados nas atividades pedagógicas da pesquisa.

Categoria	Descrição
Conceitos de Óptica Geométrica	Discussão, apresentação ou compreensão de conceitos da Óptica Geométrica.
Fenômenos ópticos	Discussão, apresentação ou compreensão de fenômenos ópticos específicos.
Reflexão	Retorno da radiação luminosa ao meio de origem após incidência em uma superfície.
Reflexão difusa	Reflexão irregular da luz que ocorre em superfícies ásperas.
Convergência	Raios de luz convergem em um ponto ou região após a reflexão em uma superfície.
Divergência	Raios de luz divergem a partir de um ponto ou região após a reflexão em uma superfície.
Outros	Fenômenos ópticos não diretamente associados à reflexão luminosa.
Astigmatismo	Distorção da imagem devido às características geométricas de uma superfície curva.
Refração	Passagem da luz de um meio de propagação para outro no qual sua velocidade seja diferente.
Difração	Desvio de uma onda luminosa ao contornar um obstáculo ou atravessar uma fenda.
Absorção	Uma superfície "captura" a energia transportada pela radiação luminosa. Importante processo na formação de sombras e penumbras.
Espelho plano	Superfície refletora plana ou associação de tais superfícies.
Espelho curvo	Superfície refletora curva ou associação de tais superfícies.
Espelho côncavo	Superfície curvada "para dentro" (exemplo: espelho de aumento).
Espelho convexo	Superfície curvada "para fora" (exemplo: espelho de vigilância).
Associação de espelhos	Superfície refletora formada por dois ou mais espelhos.

Continua

Imagem	Características de uma imagem conjugada por reflexão em uma superfície.
Orientação	Menções ao sentido vertical da imagem (direita ou invertida em relação ao objeto).
Natureza	Menções à caracterização da imagem como real (encontro de raios de luz) ou virtual (encontro de prolongamentos de raios de luz).
Posicionamento	Menções ao posicionamento da imagem, por exemplo, à frente ou atrás da superfície refletora ou referências à necessidade de mudança de posição do observador para ver a imagem.
Tamanho	Menções às dimensões verticais ou horizontais da imagem (maior, menor ou igual ao tamanho do objeto).

Fonte: quadro do autor construído a partir de planilha gerada pelo aplicativo *webQDA*.

A criação das categorias sobre os conceitos de Óptica, apresentadas no quadro anterior, foi feita *a priori* a partir da nossa experiência profissional como professor de Ensino Médio. As categorias criadas dizem respeito aos fenômenos ópticos observados pelos estudantes (tipos de reflexão, astigmatismo, refração, entre outros), à caracterização das superfícies (espelhos planos, curvos e associações) e às características das imagens observadas (orientação, natureza, posição e tamanho relativo ao objeto).

7.1. Reconceitualização do trabalho experimental

Como descrevemos no capítulo anterior, nosso protocolo de pesquisa foi desenvolvido tendo em mente as recomendações de Hodson (1994) acerca das atividades experimentais. O quadro 6 apresenta o número absoluto de falas nas quais pudemos perceber evidências da reconceitualização de tais atividades.

Uma leitura possível dos resultados apresentados no quadro 6 mostra que nossa proposta apresentou maiores possibilidades para o trabalho com a natureza e o ideário da Ciência. A prática científica, nos moldes descritos por Hodson, esteve pouco presente. Nesse aspecto, não conseguimos identificar nenhuma situação na qual os estudantes conferiram maior relevância a um problema de pesquisa em relação a outro, e também não percebemos momentos nos quais nossa proposta de ensino tenha permitido que os estudantes percebessem que a experimentação nem sempre é necessária para a construção de uma teoria científica.

Como nossa atividade não exigiu um relatório formal, também foi difícil verificar a fase de registro de uma atividade científica, que Hodson (1994) entende

como parte da prática científica. A nosso ver, esses resultados, mesmo na sua forma bruta, apontam para a dificuldade de se traduzir a prática da Ciência para o cotidiano do Ensino Médio.

Quadro 6. Número de referências relacionadas à reconceitualização das atividades experimentais.

Categoria	Total de referências
Reconceitualização	138
Natureza da Ciência	85
Descrição de fenômenos	39
Construção de hipóteses	13
Experimentação espontânea	11
Teoria e realidade	22
Ideário da Ciência	47
Ideias prévias	17
Reelaboração	21
Compreensão	9
Prática da Ciência	6
Confronto	3
Relevância	0
Sociabilidade	3
Ausência de experimentação	0

Fonte: quadro do autor construído a partir de planilha gerada pelo aplicativo *webQDA*.

A título de exemplo, podemos citar que a formação de grupos de pesquisa, a elaboração de artigos científicos ou a participação em eventos acadêmicos não são atividades pedagógicas tradicionalmente presentes no Ensino Médio. Mesmo estudantes da Graduação podem percorrer seu caminho acadêmico na Universidade sem delas

participarem ²⁶. Acreditamos que a prática da Ciência se dá, da forma como Hodson (1994) a apresenta, principalmente nos programas de Pós-graduação.

7.1.1. Natureza da Ciência

Essa subcategoria obteve o número mais significativo de referências nesse referencial de análise: quase dois terços das falas que codificamos dizem respeito aos aspectos vinculados à natureza da atividade científica. Acreditamos que essa superioridade numérica se justifica devido à abrangência da categoria: por exemplo, de acordo com Hodson (1994), faz parte da natureza científica a descrição de fenômenos e ao menos quatro perguntas do nosso protocolo de pesquisa pediam para que os estudantes descrevessem o que estavam observando.

Por exemplo, na pergunta 6, pedimos aos estudantes que eles descrevessem o que observaram quando aproximamos um longo papel centimetrado da superfície espelhada das lixeiras representativas da PGR. Usando também esses objetos refletores, na pergunta 11, pedimos aos estudantes que descrevessem a imagem de um semicírculo de pontinhos coloridos. Já na pergunta 22, os alunos também foram chamados a fazer uma descrição do fenômeno da divergência luminosa observada em uma vista superior dos prédios da PGR, obtida no *Google Maps*. Assim, parece adequada a existência de um maior número de falas referente à natureza da Ciência em comparação às outras categorias.

7.1.1.1. Descrição de fenômenos

É intrínseco à atividade científica buscar descrever de forma objetiva o que se está observando antes de partir para a sua interpretação por meio de uma teoria. Não consideramos acidental, portanto, que o maior número de referências nesse viés de análise tenha ocorrido nesse tema.

O nível de detalhamento de tais descrições, entretanto, é bastante variável. Quando pedimos a Érico que ele descrevesse a imagem refletida que ele estava observando nas lixeiras que compõem a maquete, ele respondeu que a imagem se assemelhava a uma curva de uma pista de atletismo, apresentando uma descrição simples, mas precisa. Clarice, por sua vez, já lidou com o ato de descrever um fenômeno de forma mais analítica:

²⁶ Fazemos um *mea culpa* e admitimos que nossa passagem pela graduação teve esse perfil.

Professor: Gente, as janelas dos edifícios eram todas espelhadas né? O edifício é espelhado em 360°. Se você tratasse o edifício, como um todo, como um espelho, como vocês o nomeariam? Como vocês classificariam cada edifício?

Clarice: *Convexo.*

Professor: Convexo? Convexo de que forma? Ele é esférico?

Cecília: *Ele é... Cilíndrico...*

Clarice: *Cada espelho é plano, só que eles todos juntos na estrutura do cilindro formam um espelho convexo*²⁷.

Outra possibilidade para a descrição de um fenômeno é o contraste de duas observações, como na fala a seguir:

Professor: Gente, eu quero que vocês olhem para essa imagem de diferentes ângulos. E descrevam o que vocês estão vendo. Pode mexer a Procuradoria, a lixeira, o objeto, vocês, levantem, olhem de lado...

Clarice: *Quando eu levanto lá fica bem mais comprida, quando abaixa ela fica estreita.*

Cecília: *E eu consigo enxergar a mesma coisa que eu consegui no outro, que é quando eu olho reto eu vejo a imagem bem retinha. Aí, quando eu vou me inclinando para a direita, agora, o desenho se inclina para a esquerda, e para a esquerda, o desenho se inclina para a direita.*

Percebemos que nem sempre os estudantes conseguiam terminar suas descrições. A insegurança em apresentar uma descrição equivocada foi um fator inibidor constante. Assim, foi inevitável que, por vezes, tivéssemos que colaborar na descrição, como no excerto a seguir:

Professor: Vamos para a maquete. Coloquei as lixeiras sobre os locais, tirei o papel... Então, gente, o que vocês estão observando aqui? Agora, olhando diretamente para as lixeiras, o que vocês observam? Descreva a imagem que vocês estão vendo.

Luís: *Distorcida.*

Professor: Distorcida, como assim?

Luís: *Por exemplo, ela na vertical ela é...*

Professor: Do mesmo tamanho?

Luís: *Isso, e aí na horizontal ela é esticada, o comprimento.*

Entendemos essa complementação como natural ao papel do professor. Afinal, retomando nosso referencial pedagógico, nosso trabalho ocorre na zona de desenvolvimento iminente do estudante. Se ele ainda não é capaz de descrever um

²⁷ Cabe ressaltar aqui que optamos por não referenciar a fonte das falas dos participantes, ou seja, as transcrições das atividades. As íntegras dessas transcrições podem ser consultadas nos anexos desse trabalho.

fenômeno sem ajuda de alguém mais experiente (no caso, o professor), uma intervenção se fará necessária.

7.1.1.2. Construção de hipóteses

O ato de elaborar hipóteses explicativas para um fenômeno e testá-las é próprio da atividade científica. Assim, a reconceitualização da experimentação passa necessariamente pela possibilidade do aluno poder desenvolver suas próprias hipóteses.

Admitimos que, a princípio, esperávamos um maior número de falas que pudessem ser encaradas como hipóteses. Essa expectativa não se confirmou, mostrando a dificuldade em se seguir esse preceito. Acreditamos, assim, que as atividades experimentais que conduzimos com os alunos falharam ao não permitir a emergência mais constante de hipóteses construídas por eles próprios.

Devemos ainda ser reflexivos aqui e admitir também que nossa prática profissional terminou por se revelar um fator contaminante à possibilidade de criação de hipóteses pelos próprios estudantes. Por vezes, ao analisarmos nossa participação, percebemos que não permitimos que os estudantes criassem suas proposições, ao contrário, nós as oferecíamos já completas aos alunos.

Apesar da ressalva acima, a observação das imagens astigmáticas (deformadas) na maquete se revelou um momento em que percebemos que os alunos puderam criar suas proposições. Clarice e Cecília, por exemplo, criaram duas hipóteses diferentes após o nosso questionamento, as quais são complementares:

Professor: Então, gente, por que vocês acham que a imagem apresenta essas deformações em um espelho desse tipo? Por que tem essas deformações? [...]; por que o cilindro tem tanta deformação, tem tanto astigmatismo?

Clarice: *Tinha a formação de várias imagens ao mesmo tempo. [...]*

Professor: Você tem alguma ideia, Cecília?

Cecília: *Eu acho que tem a ver com a incidência dos prédios e a luz. Eles devem refletir para várias direções diferentes.*

Professor: E aí, formam imagens em várias posições diferentes?

Cecília: *É...*

Um exemplo de construção de hipóteses durante a elaboração das construções geométricas foi dado por Cecília, a qual percebeu que cada imagem formada poderia ser encarada não apenas como um novo objeto, mas também como um novo espelho:

Cecília: *Eu estava pensando o seguinte, tipo, essa seria a primeira imagem...*

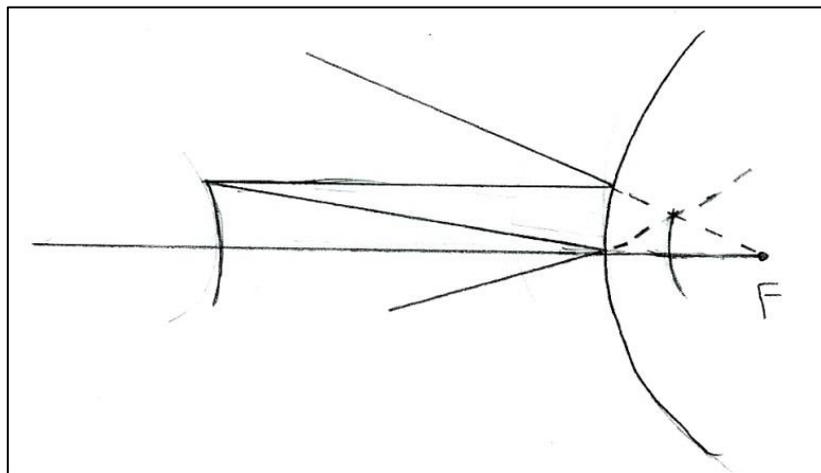
Professor: Isso.

Cecília: *Só que essa imagem aqui... Ela também estaria refletindo outra coisa. Aí, quando fosse fazer essa imagem, é aqui o foco dela. Estaria aqui e eu poderia fazer uma imagem aqui...*

Professor: A forma vai se alterando. Olha só esse novo espelho que você tem ali. Ele já tem um raio de curvatura menor, também. Ele é cilíndrico? Nem é, ele já é meio elíptico. Aí, o foco vai um pouquinho para frente também.

Chama a atenção que, embora Cecília tenha sugerido a hipótese acima (a qual, infelizmente, não é verdadeira), ela não desenhou as múltiplas imagens da PGR. No esquema entregue pela aluna (figura 26), apenas a primeira imagem é apresentada, mas seu formato curvo é corretamente destacado.

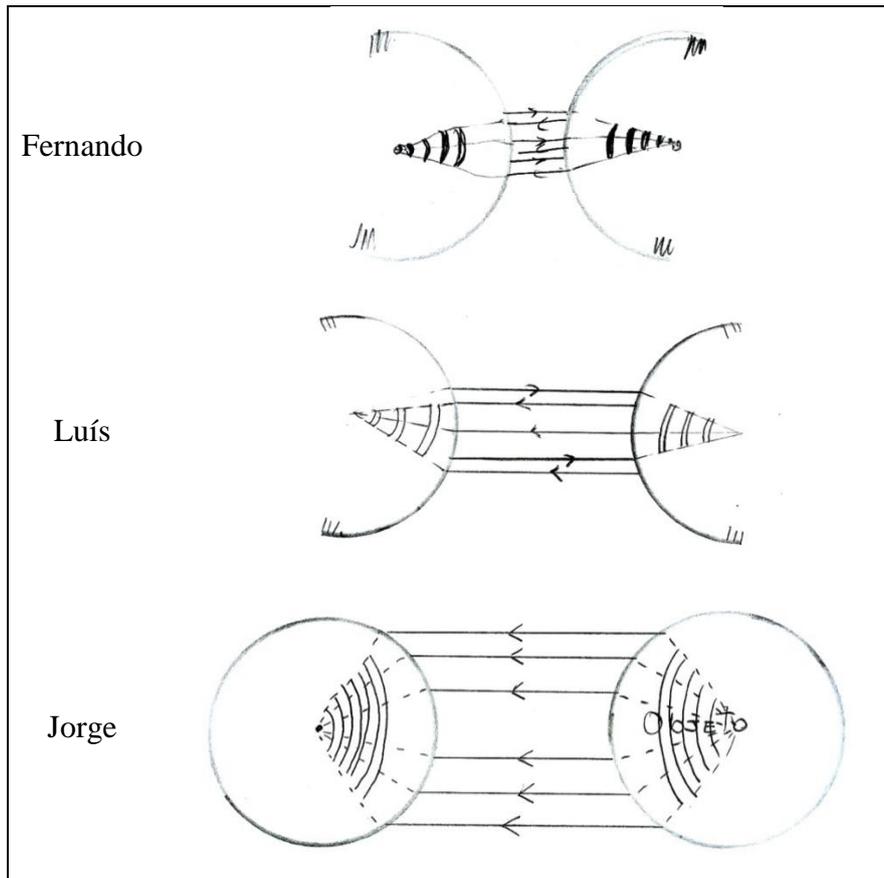
Figura 26. Esquema geométrico de formação da imagem na PGR



Fonte: esquema elaborado por Cecília (participante da pesquisa).

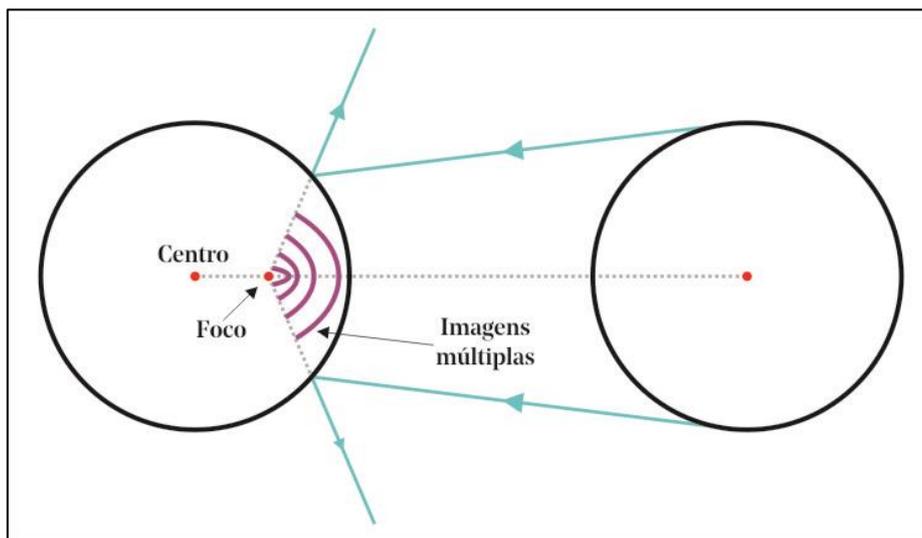
Outro momento propício à geração de hipóteses ocorreu durante a elaboração de uma construção geométrica que permitisse explicar a formação da imagem refletida por um prédio na superfície espelhada do outro. O grupo de alunos formado por Fernando, Filipe e Jorge estabeleceu uma hipótese conjunta (ainda que equivocada) para o posicionamento das imagens múltiplas (figura 27): as imagens iriam se reduzindo até formarem, no limite, uma imagem no centro da seção transversal circular do espelho cilíndrico. Na verdade, como discutiremos mais adiante, os estudantes atribuíram ao centro do espelho propriedades que são do foco dessa superfície. Um esquema geométrico mais próximo da realidade observada em termos qualitativos, sem pretensões de representá-la com perfeição, é mostrado na figura 28.

Figura 27. Esquemas geométricos da formação de múltiplas imagens na PGR construídos por três participantes da pesquisa.



Fonte: esquemas elaborados por Fernando, Luís e Jorge (participantes da pesquisa).

Figura 28. Esquema geométrico esperado para a formação de múltiplas imagens na PGR.



Fonte: desenho do autor.

7.1.1.3. Experimentação espontânea

Um laboratório é *per se* um local de investigação de hipóteses. Assim, uma prática experimental deve possibilitar que os estudantes possam conduzir sua própria experimentação, ao contrário de seguirem apenas um roteiro pré-formulado. No caso da nossa pesquisa, oferecemos algumas linhas de investigação diretamente aos estudantes, pois o protocolo de pesquisa já previa algumas investigações experimentais elaboradas por nós. Entretanto, esperávamos que os estudantes também pudessem criar suas interrogações a partir da visita de campo e do contato com a maquete representativa.

A nosso ver, essa expectativa se confirmou em pelo menos onze ocasiões durante os encontros (quadro 6). Por exemplo, Jorge usou a maquete para verificar que não seria possível conseguir uma circunferência a partir do objeto semicircular que fornecemos:

Professor: [...] Gente, vocês conseguem ver a imagem refletida do semicírculo? Eu queria que vocês olhassem de diferentes ângulos essa imagem

Jorge: *Para tentar formar uma circunferência? Será que tem como? E se a gente fizer assim? (inverte a posição do objeto)*

Dentre os participantes, Vinícius foi aquele que mais usou a experimentação espontânea durante as atividades. Por exemplo, para entender a relação entre o tamanho da imagem refletida no espelho convexo, Vinícius se valeu de uma atividade experimental espontânea, com a ajuda de um espelho plano:

Vinícius: *Tem um espelho plano por aí?*

Professor: Vou pegar aqui. Você quer comparar o espelho plano com esse aí? [...] O que vocês estão vendo?

Vinícius: *[A imagem está] superdeformada.*

Professor: E no espelho plano, já que você pegou o espelho plano... No espelho plano, tem essa deformação também?

Vinícius: *O que eu estou pensando é o seguinte: a borracha está de um lado do negócio, e se eu estiver vendo, vai estar mais próxima de mim, se eu colocar esse cara [lixeira] aqui.*

Professor: A lixeira?

Vinícius: *Tecnicamente, ela está mais próxima a mim também, mas eu estou vendo muito mais esta ponta.*

Professor: Entendi.

A seguir, Vinícius teve a ideia de colocar um objeto entre os espelhos cilíndricos da maquete, para observar a formação de imagens de um objeto particular:

Professor: [Vinícius, você] botou uma borracha aí no meio? Ficou legal! E aí, quantas imagens vocês veem?

Manuel: *Bom, era para ver o infinito né, mas...*

Vinícius (Concorda com Manuel): *Dependendo de onde você está, de onde o objeto está.*

Professor: Por que você não vê infinitas [imagens]?

Manuel: (...?) *E se eu colocar paralelo, eu consigo ver.*

Professor: Vocês chegaram a contar o número de imagens que vocês viram lá na Procuradoria?

Vinícius: *Era difícil, porque não podemos colocar uma borracha no meio.*

Professor: Mas, tinha as passarelas...

Vinícius: *Mas eles estão conectados. Só uma linha. Não dá para identificar uma da outra.*

Professor: A borracha foi um artifício muito interessante. Realmente, eu nunca tinha pensado nisso. Eu consigo ver três [imagens] quando vocês botaram a borracha.

Vinícius: *Eu consigo ver mais.*

Professor: Mais?

Vinícius: *Estou vendo primeiro, agora aqui nesse [espelho], dois, três, quatro, seis...*

A visita de campo também se mostrou propícia à investigação espontânea. O grupo de alunos percebeu, por exemplo, que a grande distância (cerca de cem metros) entre nosso ponto de observação no estacionamento e os prédios da PGR permitia escutar o eco sonoro com facilidade. No tocante à Óptica em si, Fernando me mostrou a “invasão” da luz nas bordas do objeto em uma fotografia que ele tinha obtido, afirmando (erroneamente) que ele havia derrubado o princípio da propagação retilínea da luz ²⁸.

7.1.1.4. Teoria e realidade

Silva *et al.* (2010) entendem que o papel da experimentação no ensino de Ciências é permitir a articulação entre fenômenos e teorias, isto é, entre o fazer e o pensar. Concordamos com esse entendimento, logo, esperávamos que as atividades experimentais desenvolvidas a partir da maquete da PGR deveriam permitir tal articulação.

Na análise das falas dos participantes, encontramos um conjunto de referências que permitem, a nosso ver, que essa articulação foi conseguida. Em especial, os alunos

²⁸ Infelizmente, o aluno não compartilhou essa fotografia conosco, mas ela foi obtida colocando-se a tampa de uma garrafa em frente ao disco solar, com a formação de uma “auréola” ao redor da silhueta escurecida da tampa.

usaram a maquete para visualizar a formação de imagens múltiplas nas superfícies refletoras, assim como as imagens observadas nos edifícios da PGR. A atividade experimental, entretanto, permitiu um maior nível de detalhe nessa observação, facilitando a explicação do fenômeno pela teoria.

Por exemplo, a consideração de que os prédios eram similares a espelhos planos no plano vertical explica que as imagens deveriam ter o mesmo tamanho dos objetos (ou seja, do prédio à frente). Não é fácil perceber com detalhe essa propriedade ao se observar os prédios, mas durante a atividade experimental, não houve essa dificuldade. Na passagem a seguir, um estudante observa o fenômeno refletivo na maquete e apresenta uma explicação teórica correta para a observação:

Professor: Gente, a altura das imagens em relação ao objeto, ela é modificada? Coloquem, por exemplo, usem um objeto, como uma caneta, usem sua mão... É modificada? O que vocês acham?

Luís: *Eu sei que não, porque [incompreensível].*

Professor: Mas não é modificado. E por que você acha que isso acontece?

Luís: *Porque [o espelho] é plano na vertical.*

Já no excerto a seguir, o trabalho com um modelo em escala reduzida no laboratório permitiu também que uma medição direta fosse feita sobre o modelo, favorecendo a conexão com a teoria e permitindo que um estudante verificasse que sua primeira percepção estava incorreta, conseguindo depois correlacionar o formato do espelho com a observação:

Professor: Gente, em relação ao objeto, a altura da imagem é alterada?

Raul: *Em relação ao objeto?*

Professor: É, por exemplo, a imagem tem uma altura diferente?

Érico: Não.

Professor: *O que você acha, Raul?*

Raul: Para mim, tem.

Érico: *A primeira, pelo menos, não.*

[...]

Professor: *A imagem, parece que ela fica menor, só que ela não fica. A imagem não é alterada em altura. Vou colocar a régua aqui: tem 20 cm de altura, [a altura] dela é a mesma.*

Raul: *Ah, sim.*

Professor: Ela não é alterada. O que é alterado, então, se não é a altura?

Raul: *Espessura.*

Professor: Espessura, a largura, a dimensão da horizontal. Que é onde o espelho é...

Raul: *Convexo.*

Nesse outro excerto, ao trabalhar com a maquete e observar as múltiplas imagens, uma estudante relembra uma conexão teórica entre a maquete e o fenômeno identificado na sede da PGR:

Professor: Então, vamos usar a maquete. Gente, eu coloquei as lixeiras no local onde estão os prédios da Procuradoria nessa posição. O que vocês estão observando?

Carlos: *Tem duas imagens.*

Professor: Como assim, duas imagens?

[...]

Clarice: *Eu achei assim, muito legal o que você explicou no dia [da visita]. Você falou que, quando a gente coloca dois espelhos convexos um na frente do outro, eles formam múltiplas imagens. Só que é limitado o campo delas, elas não são infinitas, igual a um espelho plano.*

Professor: Elas não vão para o infinito?

Clarice: *Isso, elas se restringem.*

7.1.2. Ideário da Ciência

A criação dessa categoria, a nosso ver, foi autoevidente: não nos parece concebível ensinar Ciência sem ter em mente a discussão do ideário científico com os estudantes, ressaltando-se, claro, que esse não pode ser o único desígnio de uma aula de Ciências. Na proposta de Hodson (1994), esse ideário deve ser discutido a partir da identificação das ideias prévias dos estudantes acerca de um fenômeno, com a posterior reelaboração dessas ideias e sua compreensão final.

7.1.2.1. Ideias prévias

Identificar o que o estudante conhece antes de se introduzir um novo conceito é uma técnica pedagógica fundamental. Percebemos, entretanto, que essa identificação nem sempre é simples, pois os estudantes podem não se sentir seguros para darem explicações sobre as quais eles não têm certeza e podem dar respostas monossilábicas ou hesitantes. A discussão a seguir mostra um exemplo dessa dificuldade:

Professor: Então, como raios, realmente, eles são...

Clarice... *Divergentes.*

Professor: Tem algo a ver com a forma do prédio? O que vocês acham?

Clarice: *Eu acho que sim.*

Professor: Espelhos convexos?

Cecília: *Eles divergem a luz.*

Professor: O que vocês esperam, galera? Que esses raios se cruzem um ponto?

Clarice: *Sim.*

Professor: Se eles não se cruzarem em um ponto específico, vocês veem algum problema?

Clarice: *Acho que sim.*

A identificação das ideias prévias nos ajudou a evidenciar que os alunos atribuem um papel muito importante ao centro de um espelho curvo e confundem suas propriedades com aquelas apresentadas pelo foco desses espelhos. Esse papel é tão relevante que o centro é evocado mesmo que o estudante esteja observando diretamente que a imagem não se forma nesse ponto ou que o professor tenha alertado sobre essa incorreção:

Professor: [...] se você olhar de cima, olha onde ele está subindo, esse é o centro. Olha até onde a imagem vai, está vindo mais ou menos até aqui, um ponto mais à frente. Não é exatamente o centro, então ele não se alinha com o meio. Que ponto vocês acham que é esse aí, aliás, que eu acabei de apontar que seria o limite dessa imagem?

Vinícius: *O último pedacinho do raio.*

Professor: Mas você acha que tem algum nome específico para esse ponto? Na verdade, tem a ver com a geometria do espelho convexo...

Manuel: *O centro?*

Professor: O centro não é o limite, se você olha de cima...

Vinícius: *Do outro lado do espelho.*

Professor: Sim, mas ele está na metade do raio, que é mais ou menos esta distância aqui que você está olhando. [...]

Ideias prévias têm fontes diversas e não estão necessariamente erradas. No caso da Óptica Geométrica, McBride (2009) nos diz que estudantes que possuem defeitos refrativos de visão (miopia, hipermetropia, astigmatismo, entre outros) tendem a possuir um conhecimento prévio qualitativamente superior sobre os conceitos da Óptica em relação aos demais estudantes. Percebemos um exemplo na fala de Luís, o qual usava óculos para corrigir hipermetropia e astigmatismo. Ao ser questionado sobre o porquê das imagens em um espelho cilíndrico serem astigmáticas, o estudante assim respondeu:

Luís: *Se você disse que é astigmatismo, eu pensaria em algo do tipo irregular. O astigmatismo, ele é...*

Professor: Não é...

Luís: *Esférico perfeitamente, ele tem algumas...*

Professor: Irregularidades?

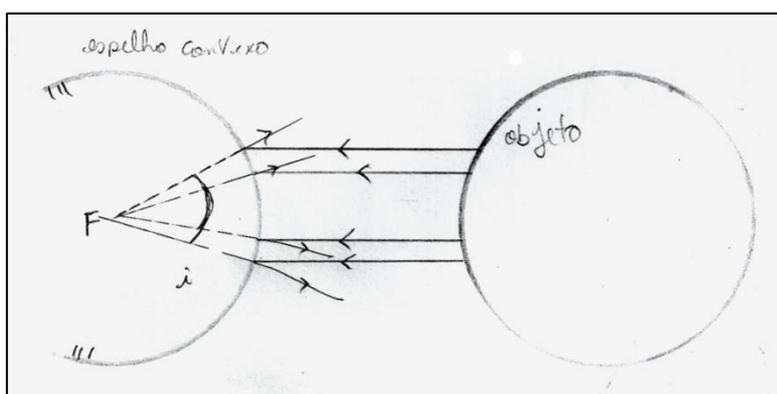
Luís: *Isso, irregularidades. Então, eu pensaria que quando você mudar o ângulo de visão, você muda a incidência nas irregularidades e muda também o lugar.*

A fala do estudante, entretanto, não está totalmente correta. O astigmatismo, tanto em um espelho cilíndrico quanto na córnea humana, ocorre devido à falta de

esfericidade da superfície. Uma superfície regular e lisa, sem as irregularidades citadas por Luís, ainda assim pode exibir astigmatismo. Após a fala do estudante, fizemos uma intervenção para rediscutir e ampliar essa ideia prévia.

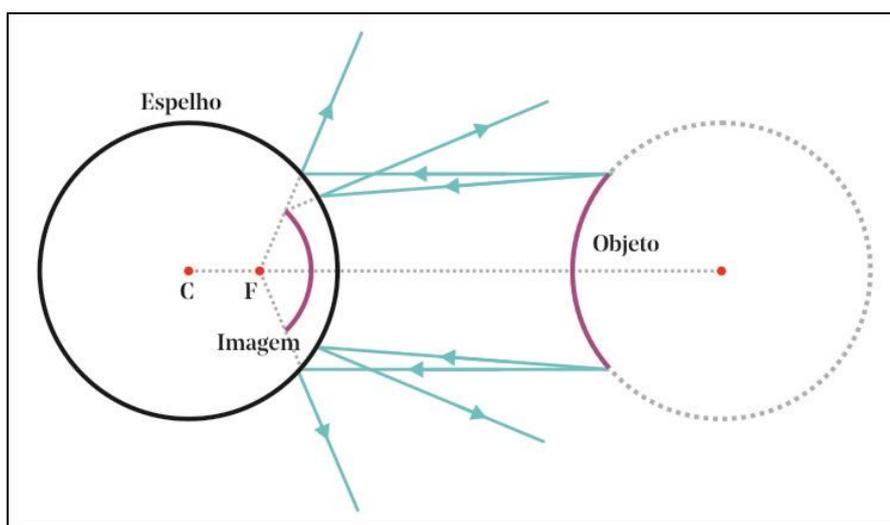
Esquemas gráficos também se mostraram eficazes para a determinação de ideias prévias. Na figura 27, mostrada anteriormente, o grupo de estudantes acredita que as imagens vão diminuindo até se concentrarem no centro. Já na figura 29, a seguir, Jorge apresenta raios de luz paralelos refletindo no espelho, com seus prolongamentos passando pelo foco, o qual o estudante desenha erroneamente no centro do espelho. A figura 30 mostra, de forma aproximada, qual seria o esquema geométrico esperado.

Figura 29. Esquema geométrico de formação da imagem refletida na PGR construído por um participante da pesquisa.



Fonte: esquema elaborado por Jorge (participante da pesquisa).

Figura 30. Esquema geométrico esperado de formação da imagem refletida na PGR.



Fonte: desenho do autor.

7.1.2.2. Reelaboração

Durante uma atividade experimental, a identificação das ideias prévias que os estudantes possuem sobre um tema é usualmente o prelúdio da reelaboração dessas ideias pelos próprios estudantes. Percebemos que o número de falas voltadas à reelaboração foi um pouco maior do que às ideias prévias, porque houve momentos em que a resposta inicial de um participante era reelaborada não apenas por ele, mas também pelos colegas.

Como exemplo da situação descrita acima, ao perguntarmos a Fernando, Luís e Jorge sobre a posição da imagem refletida pelo espelho cilíndrico convexo, Fernando respondeu que “seria a mesma coisa”, querendo dizer que a imagem estaria à mesma distância do espelho que o objeto.

Luís reelaborou essa ideia, dizendo que “[a distância da imagem] é completamente igual” quando o espelho é plano, não convexo. Jorge reelaborou essa ideia ainda mais, dizendo que a imagem iria se afastar do espelho quando esse fosse convexo. Aqui, intervimos para a reelaboração final, dizendo que a imagem em um espelho convexo poderia até parecer mais distante que o objeto aos nossos olhos, mas na realidade ela estaria mais próxima da superfície refletora.

Por vezes, a reelaboração foi menos complexa, bastando a correção de um termo específico, como na situação a seguir:

Professor: O que são essas linhas aí?

Jorge: *Dispersão.*

Professor: É isso, dispersão?

Jorge: *Não. É divergência né? [...] Divergência dos raios de luz.*

No caso supracitado, a palavra “dispersão” não era a mais adequada, pois em Óptica ela tem um significado que nos leva a pensar na produção do espectro luminoso a partir da luz branca.

A reelaboração do ideário prévio também ocorreu durante os exercícios, ou seja, as atividades escritas da pesquisa. Como exemplo, temos as perguntas 22 até 27 do nosso protocolo de pesquisa pediam que o estudante trabalhasse a partir da visão aérea dos prédios da PGR (figura 30). Cada estudante recebeu uma cópia dessa figura e, munido de caneta e régua, ele deveriam traçar diretamente sobre a imagem os prolongamentos dos “raios” refletidos pelo prédio à direita, verificando onde estariam localizados os pontos de maior concentração.

Figura 31. Visão aérea do complexo arquitetônico da PGR.



Fonte: <<https://www.google.com/maps/@-15.8076296,-47.8594703,215m/data=!3m1!1e3>>. Acesso: 08/03/2016.

A figura 32, a seguir, mostra o resultado esperado, construído por nós usando a ferramenta de edição de imagens gratuita *Inkscape*²⁹. A curva resultante do encontro dos prolongamentos é a cáustica de reflexão. Todos os alunos fizeram essa atividade e a maioria conseguiu perceber que os prolongamentos não se encontravam em um único ponto.

Figura 32. Cáustica de reflexão desenhada sobre a visão aérea dos edifícios da PGR.



Fonte: Ribeiro, 2016e.

²⁹ Para ter mais detalhes sobre a atividade descrita, na qual mostramos como fazer o traçado da cáustica a partir de imagens do *Google Maps*, ver Ribeiro (2016e).

Uma notória exceção está no desenho de Cecília (figura 33), no qual não é possível perceber a curva cáustica. Ao contrário, os prolongamentos desenhados pela estudante parecem se concentrarem um ponto específico (o foco). Conforme discutimos com a aluna durante a atividade, ela foi “traída pela teoria” que já conhecia:

Professor: Esses raios que você está fazendo, são os prolongamentos.
[...]

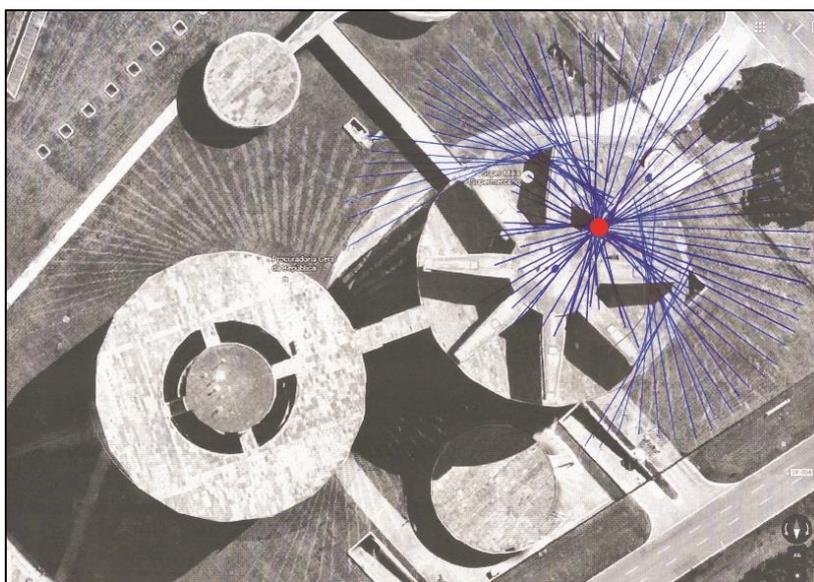
Cecília: *Aí, eles teriam que vim pra cá, né?*

Professor: Não, está errado. É porque você está acreditando que eles têm que se concentrar no foco. Alguns vão se concentrar no foco, mas nem todos.

Clarice: (...?) *É, aqui.*

Professor: Você [Clarice] já começou a perceber que eles não se encontram em um ponto só, não sei se eu vou conseguir demonstrar... Acho que vai dar sim. Aqui, gente, deem uma olhada, acho que vocês têm que olhar de cima.

Figura 33. Desenho de um participante da pesquisa sobre a visão aérea dos edifícios da PGR. A cor azul foi supersaturada na imagem para facilitar a visualização. O ponto vermelho, inserido na edição, representa o foco virtual da superfície.



Fonte: desenho de Cecília (participante da pesquisa) e edição nossa (2018).

No caso, Cecília já conhecia a teoria simplificada sobre a reflexão em espelhos esféricos, que afirma que os prolongamentos de raios paralelos incidentes em um espelho convexo irão se concentrar no foco. Como resultado desse conhecimento prévio, a estudante passou a traçar os prolongamentos a partir desse ponto (em vermelho na figura 33). Nossa intervenção, comparando a imagem obtida por ela com a imagem esperada, permitiu que a estudante reelaborasse seu pensamento inicial.

É interessante perceber que a mesma atividade, quando realizada por outro estudante, teve um efeito oposto, pois foi a partir da construção geométrica que Vinícius conseguiu identificar a posição do foco da superfície convexa:

Professor: Dá para identificar um ponto aí. O que seria o foco é um ponto de grande concentração de raios. Veja onde é que eles estão parecendo mais concentrados.

Vinícius: *Eles estão concentrados na cáustica.*

Professor: Estão mesmo. Então, vou perguntar de outra forma. Onde é o pico da cáustica?

Vinícius: *Se a prolongação toca a cáustica, esse é o pico.*

Professor: Não. O pico vai estar mais ou menos por aqui. É que você teria que terminar o desenho com todos [os prolongamentos]. Mas aqui, como você usou esse prédio, é essa que você não consegue... Nesse segundo prédio, você não vai conseguir pegar essa visão central aqui. Mas, vai concentrar mais ou menos aqui. Vocês, né... Onde está o foco em relação ao espelho convexo? Qual é a posição dele?

Vinícius: *Entre o centro e o...* (hesitante)

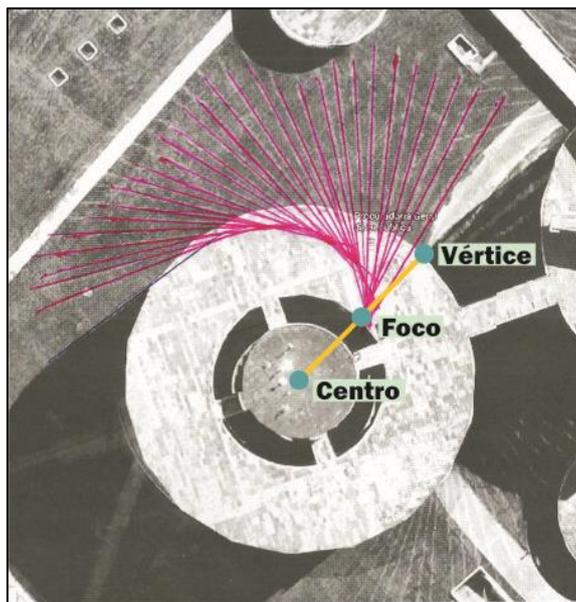
Professor: É, a gente diz, no meio entre o centro e o vértice.

Vinícius: *Eu medi o foco.*

Manuel: *Metade do raio!*

Na situação descrita, Vinícius usou o edifício à esquerda na figura 31 para fazer o seu desenho da cáustica (figura 34).

Figura 34. Desenho de participante da pesquisa sobre a visão aérea dos edifícios da PGR. A cor magenta foi supersaturada na imagem para facilitar a visualização. Os pontos azuis e a linha amarela (raio da superfície cilíndrica refletora) foram inseridos na edição.

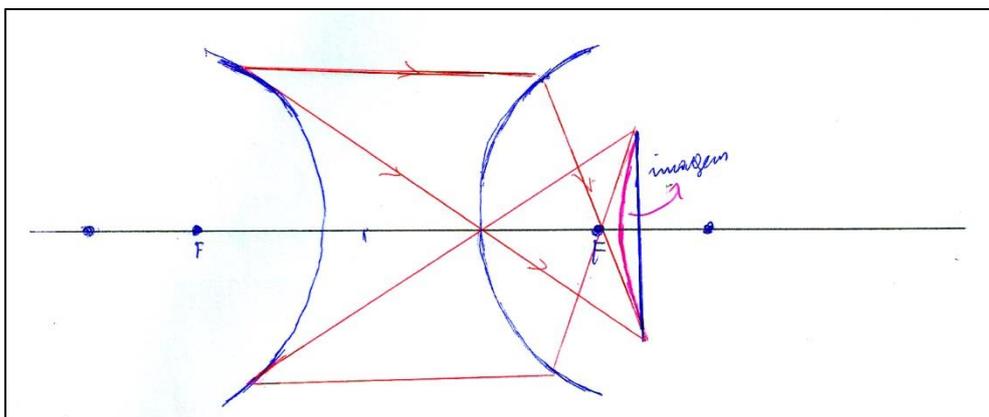


Fonte: desenho de Vinícius (participante da pesquisa) e edição do autor (2019).

Quando Vinícius nos apontou o “pico” da curva desenhada, aproveitamos para mostrar a ele e ao colega Manuel que os prolongamentos estavam se concentrando em outro ponto, onde estaria o foco. Nesse instante, Manuel usou a régua e mediu a distância entre o ponto de concentração dos raios e o centro e teve um “momento eureka”, afirmando que essa distância era a metade do raio.

Reelaborar uma ideia não significa necessariamente que a nova ideia esteja correta. Observe a figura 35, construída por Vinícius:

Figura 35. Esquema de formação da imagem de um prédio da PGR na superfície refletora do outro.



Fonte: desenho de Vinícius (participante da pesquisa).

Na fala explicativa sobre essa construção geométrica, o estudante nos explica que o problema está no fato da imagem não ser reta:

Vinícius: *Errei a imagem.*

Professor: Onde você acha que ela está?

Vinícius: *Não. Estão perfeitas as pontas...*

Professor: Ué...

Vinícius: *O que deveria ser...*

Professor: Deveria ser curva?

Vinícius: *Deveria ser curva!*

Professor: Pegue uma caneta de outra cor aí e desenhe.

Vinícius: *Eu estou tão acostumado que a imagem seja reta...*

Professor: Porque o objeto [em geral] é reto, né!

Vinícius: *É.*

Essa percepção inicial do estudante foi facilmente reelaborada após nossa intervenção, bastando lembrar a ele que o objeto inicial era curvo. O problema, entretanto, está na posição da imagem: o cruzamento dos prolongamentos (ou seja, os “raios” que na figura avançam “para dentro” do espelho côncavo) se dá antes do foco, mas Vinícius se equivocou e entendeu que a imagem deveria se formar depois deste

ponto. Para fins de comparação, retome a figura 30, na qual é exibida a construção geométrica esperada.

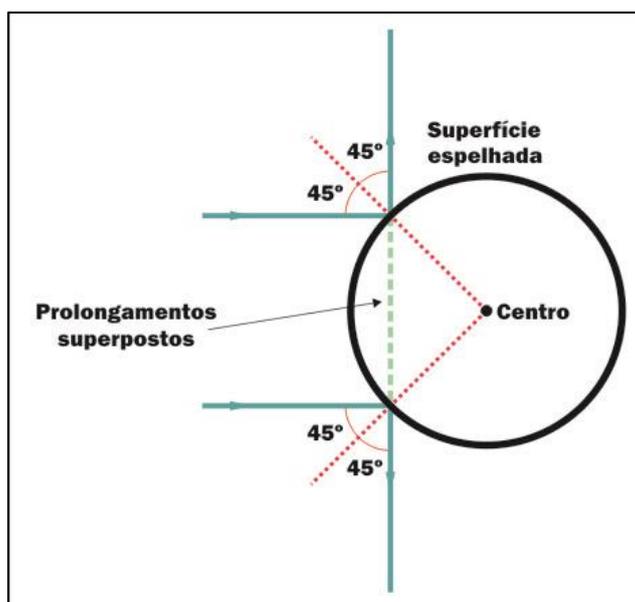
7.1.2.3. Compreensão

Ao se trabalhar pedagogicamente com um tema do ideário científico, a expectativa é que o estudante venha a compreender esse tema, após reelaborações sucessivas das suas ideias iniciais sobre o mesmo. A compreensão é o final desse processo.

Ao analisarmos o quadro 6, percebemos que essa última etapa do trabalho com o ideário científico teve menor frequência nas falas que as subcategorias anteriores (ideias prévias e reelaboração), indicando que a compreensão plena nem sempre é observada em uma atividade didática. Essa menor frequência de citações também aponta, a nosso ver, para a própria dificuldade de identificar tal processo: muitas vezes, a compreensão ocorre em um processo silencioso, não verbalizado pelos estudantes.

Assim, percebemos que as ponderações dos estudantes mais falantes ou mais analíticos foram aquelas que codificamos a compreensão com mais facilidade. As falas do estudante Vinícius dominaram essa subcategoria. Por exemplo, tomemos a figura 36, apresentada a seguir:

Figura 36. Esquema geométrico da reflexão de dois raios paralelos e simétricos em relação ao eixo de um espelho convexo com ângulo de incidência igual a 45° .



Fonte: desenho do autor (2019).

A imagem acima foi construída a partir de um diálogo que tivemos com Vinícius, apresentado no excerto a seguir:

Vinícius: *Eles não convergem assim?*

Professor: Ué, mas é preferível que você continue neste aqui, para que você observe realmente qual é a...

Vinícius: *Eu estava pensando tipo, se prolongar esse raio e aí chegar até o outro.*

Professor: No limite isso existiria, Vinícius. Você tem um raio aqui que faria, por exemplo, 45°, que refletiria pra cá; e teria um de 45°, que refletiria pra cá. Esse seu prolongamento, esse é o prolongamento, ele encontra com outro. Mas só esse, os outros não.

Vinícius: *Compreendi.*

No caso, Vinícius havia percebido por si só que se dois raios paralelos incidissem no espelho formando ângulos de 45°, seus prolongamentos iriam se cruzar em um ponto que levaria à superposição. Em outro momento, o estudante nos interpelou:

Vinícius: *Posso discutir a teoria com você?*

Professor: Pode discutir a teoria comigo.

Vinícius: *Em um espelho côncavo, é tão distante o Sol, que eu poderia considerar que está no infinito; e, se está no infinito, segundo a fórmula, vai acabar chegando ao próprio foco.*

Professor: Beleza.

Vinícius: *No convexo, no espelho, poderia sair algo similar?*

Professor: É algo similar. Só que ao invés de convergir, diverge no convexo.

A “fórmula” a que se referiu o estudante é a equação dos pontos conjugados de Gauss³⁰. O estudante percebeu que a equação (com a qual não trabalhamos na proposta de ensino aqui descrita) poderia ser aplicada para explicar a convergência de raios de luz em um único ponto, isto é, o foco de uma superfície côncava. Ao mesmo tempo, ele percebeu uma similaridade entre a divergência em uma superfície convexa e seu foco, uma evidência de compreensão do tema (divergência e convergência) que discutimos em nossa proposta.

³⁰ Na forma tradicionalmente encontrada em livros didáticos de Ensino Médio brasileiros, a equação de Gauss é escrita como $\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{p'}$. Nessa equação, f representa a distância focal do espelho, p representa a distância entre o vértice do espelho e o objeto e p' representa a distância entre o vértice do espelho e a imagem.

7.1.3. Prática da Ciência

Como já discutimos anteriormente, não detectamos nas falas dos estudantes nem nas nossas notas de campo alguma situação na qual os estudantes tenham destacado a relevância de uma teoria sobre outra ou onde eles tenham percebido que uma teoria pode ser construída mesmo na ausência de experimentação.

Assim, conseguimos identificar apenas duas subcategorias ligadas à prática científica: o confronto de ideias e a sociabilidade na construção de uma teoria. Ainda assim, o número de referências a cada uma dessas codificações foi bastante reduzido (três em cada), indicando que nossa proposta pedagógica não foi capaz de evidenciar para os estudantes aspectos relevantes às práticas cotidianas na Ciência.

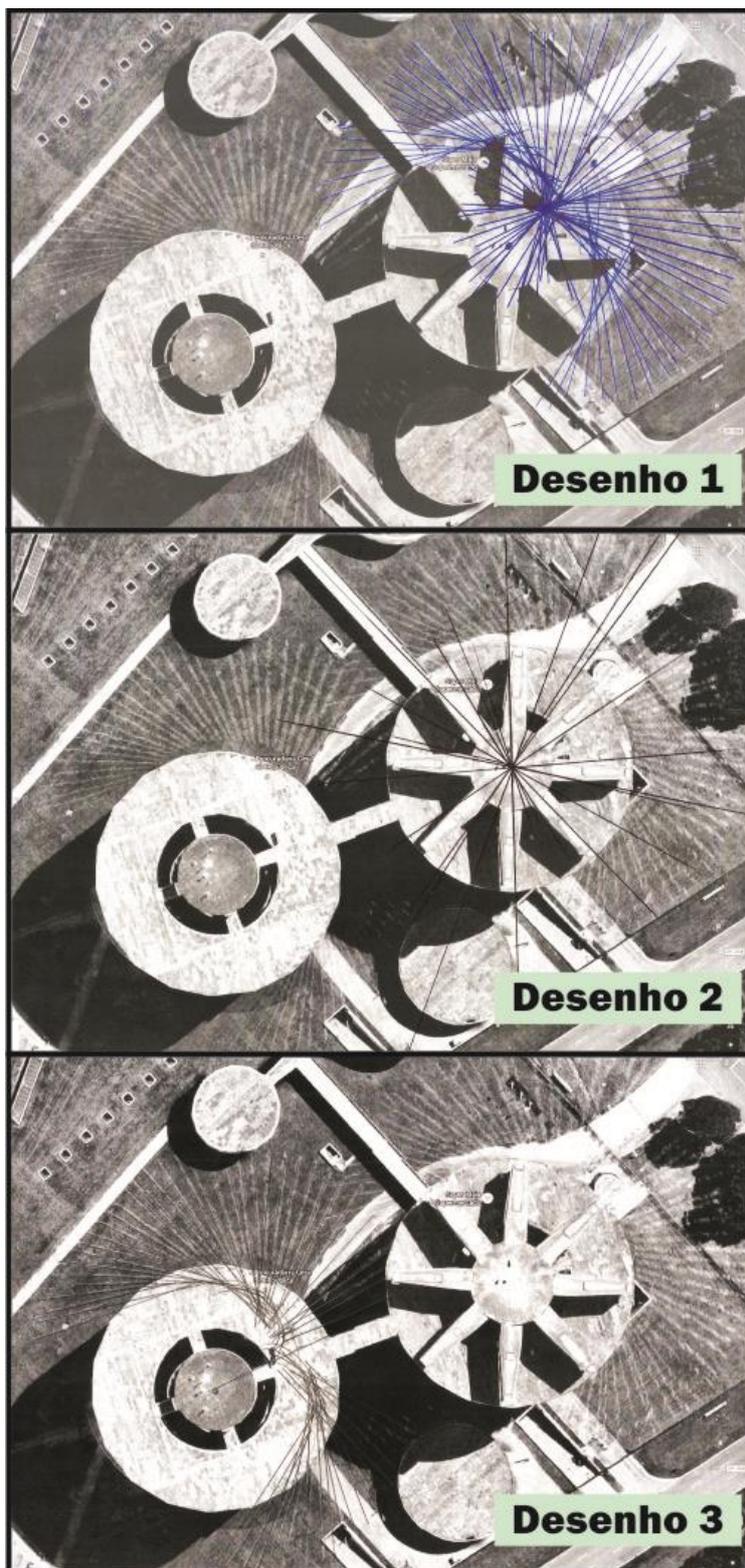
7.1.3.1. Confronto

A única oportunidade em que verificamos um real confronto de ideias foi durante a atividade de construção da cáustica sobre a visão aérea da PGR. As três ocasiões que codificamos ocorreram durante esse momento, em grupos de estudantes distintos. Para entender como uma das situações de confronto se produziu, observe a figura 37, que apresenta três esquemas geométricos para a construção da cáustica na imagem aérea da PGR, sendo perceptível que os resultados apresentados pelos estudantes nas três imagens estão bastante diferentes, permitindo o confronto dos resultados encontrados.

No caso em questão, os três estudantes tomaram caminhos diferentes para a construção: Cecília acreditou que todos os prolongamentos deveriam se cruzar no foco e passou a ignorar o comando da questão, na qual se pedia que os estudantes prolongassem as manchas de luz observadas na imagem, após alguns prolongamentos começarem a não seguir o caminho que ela acreditava como correto. Carlos tomou um caminho ainda mais excêntrico, tendo prolongado corretamente não mais que dois raios e assumindo que o centro deveria ser o local de concentração, sem evidências para isso. Apenas o desenho de Clarice representa o resultado esperado.

Logo após a confecção dos três, iniciamos o confronto dos resultados, conforme o excerto a seguir:

Figura 37. Esquemas geométricos de construção da cáustica realizados por Cecília (desenho 1), Carlos (desenho 2) e Clarice (desenho 3).



Fonte: edição do autor (2019) sobre desenhos de Cecília, Carlos e Clarice (participantes da pesquisa).

Clarice: *E aqui, olha, agora dá para ver bem certinho as múltiplas linhas!*

Professor: Isso. Mas, na verdade, não tem um ponto de concentração. Tem uma linha, que o desenho da Clarice evidenciou melhor. [...] O Carlos não está totalmente certo. Por exemplo, esse raio aqui que você desenhou não é um prolongamento. O [desenho] da Clarice está certinho e a Cecília foi traída pela própria teoria, eu acho. Porque você começou a ignorar?

Cecília: *Porque começaram a ir por lugares errados.*

Professor: Você esperava que acontecesse o que?

Cecília: *Que fosse tudo para o foco.*

Professor: É que só vai tudo para o foco naquela situação de aproximação. [...]

Tomando o relato acima como exemplo, acreditamos que situações de confronto poderiam ter sido mais frequentes caso tivéssemos incluído um maior número de exercícios práticos ou didáticos durante as atividades experimentais. Afinal, não é incomum no cotidiano escolar observar alunos confrontando suas respostas ao final de uma prova, por exemplo.

7.1.3.2. Sociabilidade

A figura estereotípica do cientista como uma pessoa que trabalha em isolamento do restante da humanidade, exibindo por vezes tendências antissociais, é cada vez mais distante da realidade da prática da Ciência. A atividade científica atual é coletiva, envolvendo trocas de informações entre pesquisadores e colaborações remotas ³¹.

Nesse quesito, decidimos excluir as interações que se dessem apenas entre o professor e um estudante específico, não porque as mesmas não representam a sociabilidade, mas porque o ideário de Hodson aponta no sentido da sociabilidade entre os estudantes de um grupo durante a atividade experimental e também na relação social entre grupos distintos. Essa exclusão tornou o número de referências ao quesito da sociabilidade na Ciência bastante reduzido.

Assim como nas referências identificadas sobre o confronto de resultados, os momentos mais suscetíveis à sociabilidade se revelaram durante a realização das atividades escritas da pesquisa. O longo excerto a seguir demonstra um exemplo, no qual Cecília e Clarice discutem sobre qual seria a melhor forma de representar as

³¹ Como exemplo dessa prática social da Ciência, um artigo publicado no periódico *Physical Review Letters* (AAD *et al.*, 2015) acerca da medida da massa do bóson de Higgs teve mais de cinco mil autores, estabelecendo um novo recorde para o maior número de coautores em um único artigo. Por razões evidentes, não reproduzimos os nomes de todos os coautores nas nossas referências.

múltiplas imagens observadas durante a atividade experimental em um desenho, sem participação do professor:

Cecília: *Ele está em direção ao foco?*

Clarice: *Não faço a menor ideia.*

Cecília: *É porque, tipo assim, eles estão um de frente para o outro. Aí, aqui, os raios estão paralelos; eles se formam através do espelho, eles vão em direção do foco, todos. A gente podia fazer a mesma coisa, só que com mais de um raio de luz sendo emitido.*

Clarice: *Mais de um raio de luz sendo emitido... Isso é muito difícil.*

Cecília: *Porque, aqui, a gente está representando com um [raio].*

Clarice: *Sabe o que acontece? Essa é a imagem desse objeto. Só que nesse seu jeito, você é um espelho. Ele está refletindo e, aí, ia ter dupla reflexão. Aí, esse aqui ia refletir outra coisa. O foco dele estaria aqui atrás.*

Logo a seguir, o professor foi convocado por Carlos, que adentrou a discussão, para responder a uma questão, a qual novamente se torna um terreno fértil para a sociabilidade, com Cecília e Clarice discordando de Carlos e também entre si:

Carlos: *Essa imagem é menor?*

Professor: *Vamos aproveitar essa pergunta: ela é menor em quê? Na horizontal ou na vertical?*

Carlos: *Na horizontal ela é comprimida.*

Professor: *Comprimida na horizontal... E na vertical? Na vertical, é meio diferente...*

Carlos: *Parece que está... Parece que é maior.*

Professor: *Vamos ver com a Clarice. Clarice, na vertical, tem tamanho diferente?*

Clarice: *Para mim tem. Olha, ela está bem aqui, só que eu estou vendo ela aqui, assim.*

Professor: *Você está vendo ela maior?*

Clarice: *Maior.*

Professor: *Bota ela de frente então.*

Clarice: *Aí não.*

Cecília: *De frente, eu vejo com o mesmo tamanho.*

Diálogos como esses não são frequentes no esquema tradicional de uma sala de aula, pois a centralidade do professor tende a inibi-los. Assim, entendemos que a reconceitualização que Hodson (1994) propõe para as atividades experimentais pode ser aplicada também às situações didáticas onde não haja experimentação *per se*.

As interações sociais apresentadas nesse item são exemplos onde identificamos oportunidades para a aprendizagem colaborativa, nosso segundo viés de análise dos dados. Vale ressaltar, antes de adentrar essa segunda forma de ler os dados, que uma mesma fala pode ter sido codificada mais de uma vez; *i.e.*, uma fala incluída em alguma

das subcategorias da reconceitualização pode também ter sido codificada em uma subcategoria pertencente à aprendizagem colaborativa.

Essa característica torna os cinco vieses de análise adotados por nós quase que independentes entre si, permitindo contar cinco diferentes “histórias” a partir da mesma essência. Como já citamos no início desse capítulo, essa prática tem a vantagem de aumentar a validade da nossa pesquisa a partir da triangulação de teorias, mas tem a desvantagem intrínseca de ser mais demorada, tanto em realização quanto em exposição, como demonstrado pelo avantajado número de páginas do capítulo presente.

7.2. Aprendizagem colaborativa

Até a etapa de qualificação da nossa pesquisa, nossa intenção era avaliar a aprendizagem de conceitos de forma individual. O próprio referencial teórico que esperávamos adotar no tocante à aprendizagem era outro (a aprendizagem significativa segundo David Ausubel). Todavia, em uma conversa com uma colega, também professora de Física, começamos a mudar essa perspectiva após ouvirmos a seguinte frase: *tudo que é diferente dá um melhor resultado em sala de aula.*

É claro que a frase acima é bastante genérica e, se submetida ao escrutínio científico, ela se revelará equivocada. Mas a ideia essencial da frase é que propostas que tragam um diferencial em relação à aula tradicional levarão a um melhor resultado na aprendizagem. Novamente, a ideia de “melhor resultado” é vaga, pois não necessariamente os alunos apresentarão um rendimento quantitativo superior ou demonstrarão terem apreendido melhor os conceitos da disciplina porque um método pedagógico não tradicional foi utilizado. Esse “melhor resultado” pode também ser interpretado em linhas diversas, como uma maior motivação dos estudantes para aprender, maior envolvimento com o conceito trabalhado, emergência de conexões com o cotidiano ou mesmo uma simples sensação de bem estar após a atividade pedagógica.

Em suma, incluímos esse preâmbulo para admitir que entendemos a aprendizagem como um fenômeno de alta complexidade, dadas as múltiplas facetas do ato de aprender. Assim, quando começamos a delinear o referencial definitivo de análise, percebemos que nossa preocupação, ao preparar as atividades da pesquisa, era permitir que os alunos interagissem conosco e entre si de uma maneira diferenciada, quando imersos em uma experiência coletiva de aprendizagem. Assim, nosso foco migrou da aprendizagem isolada de conceitos (por exemplo, o indivíduo estudando

sozinho sobre um assunto) para as possibilidades trazidas pela pesquisa para a aprendizagem colaborativa desses mesmos conceitos. No quadro 7, mostrado na página a seguir, resumimos o total de referências relacionadas a esse referencial.

A codificação empregada para construir o quadro 7 foi diferenciada em relação aos outros vieses de análise. Quando uma interação que entendemos como aprendizagem significativa era identificada nas transcrições, procedíamos à dupla codificação daquela passagem, identificando os *Personagens* da interação e também a forma (*Tipologia*) pela qual tal interação se deu. Assim, o número de referências a tais subcategorias ter sido idêntico não é acidental. Naturalmente, cada referência também não poderia ser contabilizada duas vezes, levando ao mesmo número de referências totais (44) para a categoria mais geral (*Aprendizagem colaborativa*). A seguir, exibimos um detalhamento desses resultados.

7.2.1. Personagens

Conforme descrevemos no capítulo 6, entendemos que a colaboração pode se dar de duas formas: o estudante pode interagir com um colega (ou grupo) ou interagir diretamente com o professor. A análise do quadro 7 permite afirmar que a interação dos estudantes conosco foi sensivelmente mais frequente do que entre os colegas, *i.e.*, mesmo em uma atividade pedagógica diferenciada, não é fácil eximir a figura do professor como central no processo educativo.

Apesar do resultado acima ser, a nosso ver, um pouco decepcionante, o número de referências nas quais a interação foi iniciada pelo estudante (21) superou aquelas em que tivemos que iniciar a colaboração (15), permitindo intuir que as atividades forneceram um espaço adequado para que a aprendizagem pudesse ocorrer através da colaboração entre o professor e os estudantes, minimizando um pouco os efeitos da supracitada centralidade do mestre.

Um exemplo de colaboração entre os estudantes e o professor pode ser observado a seguir:

Professor: Então, se o espelho fosse plano, o que vocês esperariam observar?

Fernando: *Um encontro bem mais definido...*

Professor: Por exemplo, pareceria, mais para longe, mais para perto, a parte que concentra, digamos?

Jorge: *Se ele fosse plano?*

Professor: Se ele fosse plano, em comparação com esse [convexo].

Jorge: *Mais para longe.*
 Fernando: *Seria a mesma coisa, não?*
 Jorge: *Se ele vai mais para perto... Ele iria mais para longe, nesse caso.*
 Professor: *No plano?*
 Jorge: *Sim, no plano.*
 Professor: *Em parte, é assim. Mas tem a ver com nosso olho, que não interpreta dessa forma. O nosso olho interpreta que está mais longe.*
 Jorge: *Que do espelho plano...*

Quadro 7. Número de referências relacionadas à aprendizagem colaborativa.

Categoria	Total de referências
Aprendizagem colaborativa	44
Personagens	44
Estudante e colega(s)	6
Estudante e professor	38
Iniciada pelo estudante	22
Iniciada pelo professor	16
Tipologia	44
Escambo conceitual	21
Escambo estratégico	9
Organização do coletivo	14
Professor	13
Estudante	1

Fonte: quadro do autor construído a partir de planilha gerada pelo aplicativo *webQDA*.

No caso acima, entendemos que nossas falas foram orientadas para que os estudantes conseguissem chegar à resposta correta, mas sem fornecê-la diretamente a

eles. Esse é um aspecto que entendemos como mais típico da colaboração entre professor e estudante, a nosso ver, do que entre um estudante e seus pares. Outro exemplo é mostrado a seguir:

Professor: O que vai acontecendo com o tamanho das imagens?

Vinícius: *Vai diminuindo.*

Professor: Vai diminuindo por quê?

Vinícius: *Porque estão mais distantes do objeto inicial, já que eles vão refletindo, então vai criando uma distância maior.*

Professor: É por aí mesmo, a luz tem que percorrer uma distância maior então, equivalente, digamos, está mais longe. Está correto.

Nessa situação, nosso papel durante a colaboração foi de assegurar ao estudante que seu *insight* explicativo estava correto. Chamamos a atenção para o fato da fala de Vinícius ter permitido que explicássemos a formação das imagens mais distantes (na situação de imagens múltiplas) a partir de uma maior distância percorrida pelo raio de luz. Tal explicação não é usual na nossa prática didática, tendo sofrido uma direta influência do pensamento do estudante, em um exemplo importante de colaboração durante o processo de aprendizagem.

Foi perceptível que os momentos de colaboração entre os estudantes ocorreram, principalmente, enquanto eles se dedicavam às atividades escritas da pesquisa (construções geométricas) ou durante a visita de campo. Por exemplo, em nossas notas, encontramos que os próprios alunos entenderam a necessidade de mudança de posição para que imagens refletidas específicas pudessem ser observadas nos sítios arquitetônicos visitados.

Também foi de livre iniciativa dos estudantes a determinação aproximada da distância que eles se encontravam dos edifícios da PGR. Ao perceberem que era possível detectar o eco do som refletido nos edifícios, Raul me questionou sobre o valor da velocidade do som, para que eles pudessem estimar a que distância nós estávamos da sede da PGR. Essa é uma típica atividade de colaboração entre os próprios estudantes, na qual tivemos pouca participação, pois antes de respondermos o valor, outro estudante (não identificado) gritou o valor correto para Raul.

A colaboração entre pares no processo de aprendizagem também pode ser detectada no excerto abaixo, quando Cecília e Clarice discutiram sobre qual seria a melhor forma de desenhar a imagem de um prédio refletido no outro:

Cecília: *Ele está em direção ao foco?*

Clarice: *Não faço a menor ideia.*

Cecília: É porque, tipo assim, eles estão um de frente para o outro. Aí, aqui, os raios estão paralelos; eles se formam através do espelho, eles vão em direção do foco, todos. A gente podia fazer a mesma coisa, só que com mais de um raio de luz sendo emitido.

Clarice Mais de um raio de luz sendo emitido... Isso é muito difícil.

Cecília: Porque, aqui, a gente está representando com um [raio].

Clarice: Sabe o que acontece? Essa é a imagem desse objeto. Só que nesse seu jeito, você é um espelho. Ele está refletindo e, aí, ia ter dupla reflexão. Aí, esse aqui ia refletir outra coisa. O foco dele estaria aqui atrás.

7.2.2. Tipologia

Ao codificarmos a forma pela qual a colaboração ocorreu, a qual intitulamos Tipologia, buscamos identificar se os personagens envolvidos trocaram principalmente informações ou conceitos entre si (escambo conceitual), se eles trocaram alguma estratégia de aprendizagem (escambo estratégico) ou se algum personagem teve que assumir o papel de organizador (organização do coletivo) para que a situação de aprendizagem pudesse se desenrolar. Todas essas operações, conforme buscamos evidenciar no capítulo dedicado ao referencial, ocorrem no âmbito da zona de desenvolvimento iminente, *i.e.*, são ferramentas valiosas para a aprendizagem.

A codificação expressa no quadro 7 mostra que a troca de informações foi mais frequente que a troca de estratégias de aprendizagem. Outra informação também oriunda desse quadro é, novamente, a centralidade na figura do professor, o qual atuou como organizador do coletivo em praticamente todas as vezes que essa atitude foi necessária, com uma única exceção.

7.2.2.1. Escambo conceitual

Uma típica situação de troca de informações é mostrada no excerto a seguir, quando conversamos com Cecília a respeito do astigmatismo visual, logo após termos usado a lixeira para mostrar a deformação da imagem refletida em um cilindro:

Cecília: Ô, professor, por que parece pior o astigmatismo com a luz? Porque, por exemplo, eu tenho muito pouco astigmatismo eu acho que eu tenho só tenho 0,75 e 0,5 só que eu tenho miopia eu tenho, tipo, três graus de miopia.

Professor: Você usa lente [de contato]?

Cecília: Eu uso lente. Aí, o que acontece, quando eu olho para a Lua, eu não consigo ver ela direito.

Professor: É uma combinação. Se fosse só miopia, você ia ver a Lua borrada em todas as direções. Agora, como tem astigmatismo também,

ela é borrada e duplicada também, digamos. Então, sem a lente, você vai ver duas luas, só que meio superpostas e borradas.

Cecília: *Aquele eclipse da Lua eu não consegui ver. Eu fiquei muito brava.*

Ainda que não tenhamos respondido à pergunta inicial da estudante (até porque não entendemos exatamente o que ela quis dizer com o “astigmatismo piorar com a luz”), há uma troca de informações. A partir da condição relatada pela estudante sobre seu problema de visão, apresentamos informações sobre o comportamento de um olho míope e um astigmático, até interpretarmos a maneira pela qual a estudante enxergava.

Outro exemplo, também relacionado à explicação sobre o fenômeno do astigmatismo, pode ser extraído da conversa entre Fernando e nós:

Professor: O que você observa quando você muda de ângulo?

Fernando: *Distorções de maneiras diferentes.*

Professor: Pode tentar detalhar um pouco mais? O que seria isso?

Fernando: *Que, tipo, o prolongamento está no foco. Então, se eu vou me movimentando, diferentes partes desse objeto vão estar no foco. Por exemplo, essa parte aqui vai estar no foco, prolongando mais para cá na extremidade, mas quando mudou minha posição, tipo eu estou mudando minha...*

Professor: Seu ângulo de visão?

Fernando: *Não, tipo, minha percepção, de acordo com esse objeto aqui.*

Professor: Por exemplo, se você olha bem aqui [de frente] ou você olha bem de cima, às vezes o objeto fica mais alongado, mais comprido. Isso aqui, gente, é chamado de astigmatismo.

Na situação descrita, conforme Fernando relatava suas percepções sobre o que estava observando, nós completávamos suas informações, até chegar ao conceito que queríamos trabalhar. O contrário também ocorreu: no excerto abaixo, é Vinícius que nos fornece informações sobre as quais ainda não tínhamos considerado:

Professor: Então, porque aqui, primeiro, esses raios se formam aí? Essas manchas no chão?

Vinícius: *Não seria um raio se fosse perfeitamente cilíndrico, porque aí seria só um... Uma faixa.*

Professor: Isso... É porque são janelas na...

Vinícius: *São janelas, cada janela reflete, não é de um ângulo, um pouco mais diferente.*

Outra situação de escambo conceitual que identificamos ocorreu quando um estudante completava o raciocínio do outro, como no excerto abaixo, no qual Raul e Érico alternam e complementam suas colaborações, trocando conceitos que levam, por fim, a uma analítica frase final:

Professor: [...] Dá para ver isso na própria maquete. As bordas da maquete, como é que elas parecem refletidas?

Érico: *Uma curva.*

Professor: Bem acentuada, né! OK. Então, por que vocês acham que isso acontece? Porque vocês acham que linhas retas viram curvas nesse tipo de espelho?

Raul: *Formato do espelho...*

Professor: Mas por que o formato do espelho distorce, transforma uma linha reta?

Raul: *Porque a luz deve bater no espelho e dispersar para o lado. Deve bater e refletir como no espelho plano, se é que é meio reflexão difusa, sim, só que...*

Érico: *Aí, alonga o objeto. E como o formato do espelho é um cilindro, vai alongar ele em forma de um círculo, de um cilindro, no caso!*

7.2.2.2. Escambo estratégico

A troca de estratégias de aprendizagem é, a nosso ver, mais complexa do que a troca de informações e conceitos, daí sua menor frequência de ocorrência, a qual não nos surpreendeu. Contudo, entendemos que essa troca de estratégias pode ser ainda mais fundamental, na medida em que mesmo estudantes com cognição mais elevada podem se valer dela. Na verdade, até mesmo o professor, como no excerto a seguir:

Vinícius: *Na visita de campo não dá para colocar uma borracha no meio!*

Professor: Essa é a desvantagem?

Vinícius: *E não dá para entrar e experimentar com as fotos.*

Professor: Na visita de campo você me falou isso. Aí, eu poderia tirar uma foto do meio dos prédios. Aqui dá para fazer.

Vinícius: *Se fosse no prédio, seria só eu e a câmera contra um prédio gigante. Aqui a câmera já faz quase metade do prédio.*

Professor: É o problema da escala, toda vez que a gente usa uma coisa em escala menor, você tem algum ganho, mas teria também esses problemas.

O diálogo acima representa um momento em que perguntamos a Vinícius e Manuel sobre as vantagens e desvantagens da visita de campo e das maquetes. Vinícius imediatamente nos lembrou sobre algumas fotografias que ele gostaria de ter obtido na visita, as quais encontramos em nossas notas de campo: tirar uma fotografia do topo de um prédio lateral e tirar uma fotografia por baixo, mas exatamente no meio dos dois prédios. Essa é uma estratégia diferenciada de detecção e registro de um fenômeno, a qual não havíamos pensado antes, mas que se tornou inescapável após o diálogo. Vale a pena ressaltar que, ao analisarmos as ocorrências de escambo estratégico, percebemos que quase todas as referências tiveram Vinícius como um dos interlocutores.

7.2.2.3. Organização do coletivo

Como já comentamos anteriormente, nossa análise evidenciou que praticamente não demos oportunidades aos alunos para que eles próprios organizarem a situação coletiva de aprendizagem, ou seja, terminamos por nos manter em grande parte no papel do professor como centralizador do processo de aprendizagem. Só conseguimos perceber uma única situação, onde o aluno Raul coordenou a observação, inclusive direcionando nosso próprio olhar:

Érico: *Porque da forma que ele olha...*

Raul: *Está vendo esse troço aqui?*

Érico: *Parece que ele vê um semicírculo, tipo outro semicírculo...*

Professor: Dois semicírculos, tipo, formando 90°...

Raul: *Tipo...*

Professor: Entendi, invertido, um em relação ao outro.

Raul: *Mas bem pouquinho.*

Professor: Confesso que eu não consegui ver, mas depois eu tento dar uma olhada.

Ainda assim, consideramos válidas as intervenções que fizemos, pois consideramos natural o papel de organizador de um coletivo recair sobre o professor, mesmo fora de uma aula tradicional. Tomemos como exemplo um jargão que se tornou popular, no qual o professor é visto como um “gestor da sala de aula”, ou seja, alguém que controla, direciona ou impulsiona as situações coletivas de aprendizagem. Embora a visão seja simplista, ela apresenta o papel do professor como um inescapável organizador do coletivo e não como um centralizador de ideias *per se*. Por exemplo, no excerto a seguir, nosso papel foi fundamental para organizar as ideias conflitantes dos estudantes de forma coerente:

Professor: Gente, em relação ao objeto, a altura da imagem é alterada?

Raul: *Em relação ao objeto?*

Professor: É, por exemplo, a imagem tem uma altura diferente?

Érico: *Não.*

Professor: O que você acha, Raul?

Raul: *Para mim, tem.*

Érico: *A primeira, pelo menos, não.*

[...]

Professor: A imagem, parece que ela fica menor, só que ela não fica. A imagem não é alterada em altura. Vou colocar a régua aqui: tem 20 cm de altura, [a altura] dela é a mesma.

Raul: *Sim.*

Professor: Ela não é alterada. O que é alterado, então, se não é a altura?

Raul: *Espessura.*

Professor: Espessura, a largura, a dimensão da horizontal. Que é onde o espelho é...

Raul: *Convexo*.

7.3. Cidades Educadoras

Após a codificação, obtivemos um total de 89 referências ao conceito de Cidades Educadoras. A divisão nas subcategorias está mostrada no quadro 8.

Quadro 8. Número de referências ao ideário das Cidades Educadoras.

Categoria	Total de referências
Cidade educadora	89
Arquitetura e Ciência	18
Planejamento	11
Estética	6
Sentir a cidade	25
Aprender na cidade	29

Fonte: quadro do autor, a partir de planilha gerada pelo aplicativo *webQDA*.

Os resultados expostos no quadro anterior nos levam a conjecturar que a proposta pedagógica foi bem-sucedida no tocante a propiciar situações de aprendizagem a partir do ambiente urbano e levar os estudantes a vivenciar a cidade com seus sentidos. Destacamos ainda o fato de temas como Planejamento e Estética, usualmente associados ao imaginário sobre a capital brasileira, terem sido menos citados pelos estudantes do que a relação entre Arquitetura e Ciência.

Atribuímos esse maior número de referências às características pedagógicas da proposta. Nossas notas de campo apontam que os estudantes não perceberam a visita de campo como um passeio turístico, ao contrário, eles encararam esse momento como uma situação de aprendizagem, fato refletido nas falas que codificamos. A seguir, detalhamos os resultados encontrados em cada uma das subcategorias desse viés de análise.

7.3.1. Arquitetura e Ciência

Nessa subcategoria, incluímos as passagens nas quais identificamos que os estudantes estabeleceram relações entre teorias científicas em geral (não se limitando apenas à Óptica) e os objetos arquitetônicos. Percebemos que a emergência dessas relações nas falas dos participantes foi mais frequente durante a etapa final do nosso protocolo aprender / ensinar, quando as perguntas lidaram com essa relação entre Arquitetura e Ciência de forma mais específica.

Apesar disso, ainda na visita de campo já foi possível perceber que os estudantes estabeleciam essa correlação. Ao serem questionados sobre o formato dos prédios da PGR enquanto espelhos, houve uma divisão nas respostas, também verificada no questionário prévio às atividades experimentais (ver capítulo 6). No caso, um grupo de estudantes considerou cada prédio, como um todo, como um grande espelho cilíndrico e convexo. Outros participantes consideraram apenas as janelas como superfícies refletoras, estabelecendo que tais espelhos eram planos.

Ao serem questionados de forma mais direta sobre essa relação entre Arquitetura e Ciência, as respostas revelaram que o projeto permitiu que os estudantes conectassem essas duas disciplinas com naturalidade. Por exemplo, Luís destacou que os conceitos científicos se tornaram perceptíveis em tais estruturas após o projeto:

Professor: Então, começando pelo Luís! Luís, você acredita que o projeto contribuiu para alguma mudança da sua visão sobre a cidade?

Luís: *Eu acho que sim, porque a partir do momento que eu vou saber disso, nas próximas vezes que eu for olhar nas coisas que têm alguma semelhança, as relações que a gente viu, eu vou relacionar, associar as coisas e até contar para as outras pessoas. Como é que se forma o foco, por exemplo, a curva cáustica e também o espelho da água, essas coisas. Quando eu conheço, eu posso fazer inferências de diversos outros lugares.*

Clarice, por sua vez, destacou que o projeto permitiu estabelecer uma correlação entre os conceitos discutidos em sala de aula e os objetos arquitetônicos, os quais se incluem no cotidiano dos estudantes:

Professor: E você, Clarice, o que você acha o projeto contribuiu para uma mudança da sua visão sobre a cidade?

Clarice: *Eu acho que sim, por que a gente viu muito isso dentro de sala de aula, a gente está no ensino médio, estamos estudando sobre isso agora... Só que, antes, eu passava na rua e não me atentava, por exemplo, em ver que a Procuradoria da República são dois prédios cilíndricos convexos.*

Professor: Era apenas um prédio...

Clarice: *Era apenas um prédio espelhado. E eu acho que assim, Brasília é muito... Milimetricamente... Certinho, tudo muito igual, muito planejado, calculado. [...]*

Também vale destacar que os alunos puderam perceber a necessidade da compreensão de conceitos da Física para o estudo das fachadas espelhadas, ou seja, deram uma resposta ao tradicional questionamento sobre “para quê eu vou usar isso?”. A fala de Érico nos fornece um exemplo:

Professor: É porque, na prática, se a gente observa alguma coisa, a luz está refletindo [naquela coisa].

Érico: *Exatamente. Então, você precisa da Óptica, você precisa entender isso para compreender melhor esses fenômenos. Até mesmo para compreender o aspecto do conforto térmico também. Muitas vezes, o espelho é utilizado para dar uma sensação de amplitude do espaço, então é legal, porque mostra para gente a cidade de uma forma diferente associada a esses conceitos da Física.*

7.3.2. Planejamento

Uma das características mais conhecidas de Brasília é o fato da sua implantação ter sido planejada, ou seja, ocorrido a partir de um plano urbano prévio. É interessante perceber que o imaginário popular não vincula o planejamento com outras cidades brasileiras que também foram projetadas antes de sua edificação, como Goiânia e Belo Horizonte.

Assim, já imaginávamos que algumas falas dos estudantes iriam apontar, defender ou condenar a necessidade de um planejamento prévio em Arquitetura. Cecília resumiu tal necessidade em sua fala: “não tem acidente em Arquitetura”. Já Carlos afirmou que o projeto reforçou seu pensamento de que tudo na cidade era planejado, pois nas palavras do estudante, “vi eventos que só foram possíveis com planejamento”.

As falas de Manuel e Vinícius indicam que o planejamento em Arquitetura é, no fundo, a busca pelo acerto, pelo detalhe:

Manuel: *A arquitetura mostra ser muito mais bem planejada do que se pensa originalmente. Você olha assim, rapidamente, você não vê esse monte de coisas. Mas, com esse projeto a gente foi lá e viu que tinha isso, e isso, aquilo. Mostra o quanto isso foi realmente muito bem projetado.*

Vinícius: *E as coisas tem que ser bem planejadas, ou seja, as distâncias têm que ser perfeitas ou quase perfeitas para fazer o final que você queria.*

O nome de Niemeyer foi bastante citado pelos estudantes, fato que não se revelou uma surpresa para nós, dada a relação simbiótica entre o arquiteto e a capital. Fernando, ao comentar uma fala de Jorge de que a visão aérea dos prédios da PGR lembrava a Lua e o Sol (ver figura 31), se referiu a Niemeyer como alguém que não fazia nada ao acaso. Raul atribuiu também ao arquiteto uma intencionalidade de conseguir o efeito da reflexão múltipla ao projetar o complexo da PGR.

7.3.3. Estética

Brasília foi incluída como Patrimônio Cultural da Humanidade em 1987, sendo notório o caráter inovador dos edifícios públicos. Assim, já antevíamos que comentários sobre a beleza das obras arquitetônicas da capital se fariam presentes nas falas dos estudantes ³².

As menções à qualidade estética da Arquitetura da cidade, entretanto, não foram tão frequentes como imaginávamos a princípio, pois os estudantes preferiram destacar os aspectos voltados ao planejamento da cidade, como discutimos no item anterior. Uma estudante destacou que a estética era importante, mas era parte de um todo maior:

Cecília: É que, assim, você fica pensando que, poxa, Brasília tem muita coisa legal, muita coisa diferente, porque as prédios não foram construídos só para serem bonitos, tem todo um propósito.

Professor: Mas você acha que a beleza faz parte da função deles? Alguns claramente foram construídos para serem bonitos. Vocês acham que a beleza é importante em um prédio?

Cecília: Eu acho que é a beleza que entretém o público.

Outro estudante, por sua vez, considerou que a própria estrutura dos prédios da PGR tinha um caráter inusitado:

Luís: Eu lembro daquilo que você [professor] falou, que o prédio é sustentado por cima e não por baixo. Parece que está flutuando. ³³

Em uma nota de campo, percebemos que os estudantes, ao serem estimulados a fotografar os sítios arquitetônicos, não desejavam apenas mostrar os fenômenos ópticos que queríamos que eles percebessem. Ao contrário, havia uma busca intrínseca por estética nas fotografias. Essa anotação recebeu grande apoio quando recebemos os

³² Para maior detalhamento sobre a questão da capital como Patrimônio Cultural da Humanidade, acessar <http://whc.unesco.org/en/list/445>.

³³ Na verdade, o estudante provavelmente quis se referir ao fato de um dos prédios da PGR ser sustentado por tirantes acima do prédio, e não por baixo, como na fala transcrita.

registros fotográficos, que os estudantes compartilharam conosco (exceto o estudante Carlos, que não possuía celular), como informamos na metodologia.

A partir desses registros, foi possível perceber que oito alunos, por exemplo, fotografaram o *Meteoro*, a orgânica escultura de Bruno Giorgi que adorna o espelho d'água do Palácio do Itamaraty e que é um clássico cartão-postal brasileiro. Em particular, a foto do estudante Jorge (figura 38) apresenta uma bela composição desses elementos. O aluno Vinícius também fotografou outra escultura abstrata no espelho d'água da Caixa Econômica Federal, contrastando o proposital tom de ferrugem da escultura com o tom azulado dos ladrilhos.

Figura 38. Escultura *Meteoro*, de Bruno Giorgi, à frente do Palácio do Itamaraty (esquerda); Escultura abstrata refletida no espelho d'água do edifício-sede da Caixa Econômica Federal (direita).



Fontes: Esquerda: fotografia obtida por Jorge (participante da pesquisa); direita: Fonte: fotografia obtida por Vinícius (participante da pesquisa).

Outros estudantes buscaram outras estratégias para trazerem elementos estéticos para a fotografia (figura 39): o aluno Fernando pediu para que um colega o fotografasse de costas, olhando para o prédio da PGR, em atitude que invoca contemplação. Os alunos Jorge e Clarice também se incluíram nas fotografias. A aluna Clarice, aliás, obteve um inusitado efeito ao fotografar os edifícios da PGR. Os prédios, os quais são espelhos cilíndricos convexos, são mostrados refletidos em uma lente de óculos escuros, a qual é um espelho esférico convexo.

Figura 39. Fotografias obtidas pelos estudantes no complexo da PGR.



Fonte: Esquerda: fotografia obtida por Fernando (participante da pesquisa); direita: fotografia obtida por Clarice (participante da pesquisa).

7.3.4. Sentir a cidade

Ao contrário de capitais europeias como Paris e Bruxelas, Brasília não é uma cidade onde o *flanar* é valorizado, ou seja, o ato de andar pela cidade quase a esmo, a fim de apreciar o espaço urbano através dos sentidos, como a visão e a audição. Nosso projeto visava propor ao menos uma pequena modificação nesse hábito, em especial durante a visita de campo.

Nossa intenção pode ser resumida na frase de Clarice: queríamos que os estudantes passassem a ver as “coisas cotidianas por um olhar diferente”. Por exemplo, durante a visita de campo, alertei aos alunos que eles poderiam perceber que seu posicionamento interferia nas imagens que eles conseguiriam observar. Ao se referir a essas imagens, Cecília descreveu o que era possível observar nas fachadas espelhadas da PGR de forma objetiva:

Cecília: Ah, eu me lembro das imagens, que tipo tinha imagens do espelho refletindo outro espelho, e também eu me lembro de tirar foto da bandeira do Brasil refletida lá atrás só que às vezes ela sumia de uma hora para outra, depois ela voltou a aparecer.

Em outra passagem, a mesma estudante adotou um tom mais subjetivo, quase emocional, ao se referir aos momentos da visita de campo:

Cecília: Assim, é porque as pessoas que criaram essas obras, elas pensaram muitas coisas. E acho um desperdício essas pessoas irem lá

e criarem os prédios tão detalhados e cheios de segredos, e as pessoas não saberem.

O ato de sentir a cidade envolve uma natural imprevisibilidade, como a interação com vendedores ambulantes ou a apreciação da arte urbana, em especial o grafite, situações que os alunos puderam vivenciar durante a visita. Sentir uma cidade inclui também a comparação com a vivência em outros espaços urbanos. Vinícius, por exemplo, morava em Santiago do Chile antes de vir para Brasília. Segundo o estudante, os edifícios brasileiros “são todos bem parecidos com os do Chile”.

O mesmo estudante, durante a visita de campo, descreveu duas possibilidades inovadoras para fotografar a PGR, as quais ele não pôde realizar pois o complexo não é aberto ao público nos sábados: Vinícius sugeriu subir no topo de um prédio lateral, porque o prédio poderia então ser visto por completo, totalmente distorcido, na imagem refletida; ou fotografar os prédios por baixo, posicionando-se exatamente no meio dos dois edifícios. Esse é, a nosso ver, um típico exemplo de sentir a cidade: a forma mais simples de evocar tais percepções é inserindo-se no próprio ambiente.

7.3.5. Aprender na cidade

Sentir e vivenciar a cidade são partes de um todo maior: o ato de aprender na cidade. Desde a gênese desse trabalho, acreditamos que deveríamos viabilizar que os estudantes pudessem estabelecer novas leituras sobre a cidade a partir da discussão e aprendizagem de conceitos físicos durante a proposta.

A análise das falas dos estudantes e das notas de campo nos mostra que, como esperávamos, a visita de campo se revelou propícia para a emergência de momentos do aprender na cidade. Um exemplo típico foi a descoberta pelos próprios estudantes de que o som das vozes deles sofria reflexão nos prédios e retornava como ecos sonoros, devido à grande distância que prédios se encontravam.

Ainda durante a visita de campo, Érico chamou nossa atenção para as ondas existentes no espelho d'água do edifício-sede da Caixa Econômica, questionando-nos sobre como elas eram produzidas. Tivemos a oportunidade de estabelecer nesse momento junto aos estudantes uma relação entre o pequeno comprimento de onda, a baixa velocidade e a pequena profundidade do espelho d'água. Esse também se revela um exemplo importante do aprender na cidade: não era nossa intenção original discutir esse tema, mas a oportunidade se revelou a partir da estrutura arquitetônica. Já no espelho d'água do Itamaraty, Carlos notou que as ondas produzidas na água eram

refletidas pelos canteiros e, na sua fala, “ficavam uma sobre a outra” – ou seja, sofriam interferência.

Outra oportunidade de se aprender conceitos de Óptica durante a visita de campo surgiu em uma discussão sobre a cor da película refletora que reveste os edifícios da PGR. Quando questionei os estudantes sobre essa coloração, Clarice respondeu que a película era “fumê”. Na realidade, tais películas são prateadas, daí podermos associá-las a espelhos. Após comentar com os estudantes sobre essa característica, Clarice relatou que havia passado à noite pelos edifícios e que tinha observado todo o movimento interno dos edifícios, pois os vidros estavam “pretos” – ou seja, a ausência da forte iluminação externa que ocorre durante o dia faz com que a refração da luz seja observável, pois a película é, na realidade, um espelho semitransparente. Aproveitei para discutir as propriedades desse tipo de espelho com os estudantes.

No caso da atividade em laboratório, estabelecemos a pergunta final do protocolo de pesquisa (questão 29) com a intenção de questionar se os estudantes acreditavam que o projeto poderia ter contribuído para uma mudança da visão deles sobre a cidade. A análise das respostas nos permite conceber que os estudantes apreciaram o fato de que conceitos da Óptica poderiam ser usados para explicar os fenômenos observados nos edifícios, levando a uma nova percepção sobre essas estruturas e seus componentes. As falas a seguir exemplificam essa percepção:

Fernando: [...] Assim, tipo, antes eu só via o prédio, mas não prestava muita atenção, tipo, não ao espelhamento... Mas é exatamente isso, professor, então, assim, por exemplo, antes eu passava nos prédios, nem me tocava que eram espelhos nem nada assim e agora...

Raul: Tipo, eu vou observar mais como as coisas são feitas, os fenômenos, os porquês. Porque tem prédios que são feitos de espelhos... E por que são feitos de espelhos? Temperatura, aí, quais fenômenos que envolvem refração, reflexão, essas coisas.

A percepção de uma aplicação de uma teoria científica no ambiente urbano foi também valorizada:

Érico: Então, na realidade, o aspecto que contribuiu para ver a cidade de uma forma diferente é que você é, muitas vezes em sala de aula, você viu aquilo só na teoria e você deixa de ver na prática. Mas você observando isso na cidade, você vê que a Óptica [está] atrelada a qualquer coisa que você observa.

A fala de Jorge corrobora essa afirmação e funciona como um resumo adequado para as possibilidades que nossa proposta trouxe para o aprender na cidade:

Jorge: [...] *Eu acho que quando você vê a Física no dia-a-dia, fenômenos ópticos, ou seja, quais fenômenos físicos, mas, por exemplo... É quando você vê um fenômeno se aplicando na realidade na sua cidade, que você convive todo dia, você tem um novo olhar sobre ela, completamente diferente, porque antes, eu passava na Procuradoria... Era apenas um prédio! E agora mudou essa visão totalmente.*

7.4. Maquetes e visita de campo

Um dos caminhos aventados durante a nossa pesquisa era fazer uma comparação entre um trabalho laboratorial a partir de maquetes e uma visita de campo *in loco* às estruturas arquitetônicas representadas pelas maquetes. Como relatamos ao longo dessa tese, o trabalho tomou outras dimensões e novos vieses analíticos se somaram a essa proposta inicial.

Ainda assim, percebemos que jogar um pouco de luz sobre tal comparação poderia se revelar importante. Afinal, o laboratório tradicional e a visita de campo são técnicas pedagógicas que podem ser entendidas como formas diferentes de experimentação (SILVA *et al.*, 2010). Daí optarmos por analisar as opiniões dos estudantes sobre tais práticas. Após a codificação, construímos o quadro 9 com as referências que identificamos.

Quadro 9. Número de referências sobre maquetes e visita de campo.

Categoria	Total de referências
Maquetes e visitas de campo	51
Aula não tradicional	8
Teoria "na prática"	7
Internalidade	10
Externalidade	18
Representação	8
Adequada	4
Inadequada	4

Fonte: quadro do autor, a partir de planilha gerada pelo aplicativo *webQDA*.

Essa categoria apresentou, a nosso ver, uma distribuição de falas relativamente uniforme entre as subcategorias, com um leve destaque para os aspectos voltados à externalidade das maquetes, ou seja, às possibilidades didáticas do uso de uma

representação em escala reduzida de uma obra arquitetônica. As subcategorias estão detalhadas a seguir.

7.4.1. Aula não tradicional

Tanto o trabalho no laboratório quanto a visita de campo foram percebidos pelos estudantes como aulas não tradicionais, ou seja, aquelas que ocorrem no ambiente de uma sala de aula comum. A fala de Vinícius sobre essas metodologias didáticas assim exemplifica nossa percepção:

Vinícius: [Nas duas], basicamente, uma aula fora da sala. Visita de campo, mas, essa aqui [com as maquetes] também é fora de sala.

Ambas as metodologias de ensino foram consideradas satisfatórias pelos estudantes. Por exemplo, Jorge destaca:

Jorge: Eu acho que as duas [formas de ensino] são interessantes, porque você não fica só no tradicional da sala de aula, tipo, desenhar um objeto, os raios notáveis e tudo.

Não ficamos impressionados com a maior receptividade dos alunos com a visita de campo, em comparação ao trabalho com as maquetes, pois há uma intrínseca ludicidade nesse tipo de atividade, como Fernando nos diz:

Fernando: Só que assim, uma pesquisa de campo, que a gente vai para os lugares, é bem mais divertida e menos monótona do que o trabalho com uma maquete.

Nem tudo são flores, contudo. As falas a seguir mostram que mesmo uma rápida visita de campo pode trazer algum desconforto:

*Carlos: Bem, da visita de campo, é que tem os deslocamentos, né? Custos... Estava um calor da p***a (risos). A companhia lá no ônibus também não era agradável (irônico).*

Vinícius: Sair fora de casa... Esse fator único já tem vantagem e desvantagens. Você faz exercício, mas cansa mais, requer mais energia, mais hidratação, então, é mais caro de recursos.

Ainda assim, a sala de aula tradicional resiste, pois há situações nas quais ela é mais adequada, como Manuel nos diz:

Manuel: Sim, eu acho que é mais legal fazer uma aula que não seja só no quadro o tempo todo. Algumas coisas realmente funcionam melhor no quadro, mas nem tudo. Esquema geométrico é muito melhor [no quadro].

7.4.2. Teoria "na prática"

Nas palavras de Carlos, a visita de campo permitiu a ele “ver uma aplicação no mundo real”, evidenciando uma apreciação pelo fato da teoria discutida em sala de aula ser “útil”, ou seja, exibir relação com o cotidiano fora da sala de aula. Não podemos afirmar que ficamos surpresos com essa afirmação: afinal, nossa proposta era exatamente trabalhar conceitos da Óptica a partir da Arquitetura.

As ações e falas dos estudantes evidenciam que essa relação foi estabelecida durante as atividades didáticas. Por exemplo, ao ser perguntado sobre as vantagens e desvantagens das maquetes e da visita, Jorge nos respondeu:

Jorge: E também a visita de campo é melhor ainda, porque você consegue ver na prática o que realmente acontece, você consegue realmente observar o fenômeno. Mas os dois, eu acho que são interessantes para o ensino.

Uma dessas evidências ocorreu durante a visita ao sítio da PGR, quando Raul e Érico nos chamaram para mostrar uma comparação entre as imagens obtidas em uma garrafa térmica (cilíndrica e espelhada) com aquelas exibidas pelos edifícios. Érico foi além e tentou registrar uma fotografia dos prédios da PGR refletidos nos seus óculos escuros, que ele identificou para nós como convexas. Após algumas tentativas para encontrar o ângulo adequado, o aluno desistiu de obter essa foto e deixou que Clarice a registrasse (ver figura 39).

Outra comparação entre objetos refletores e as fachadas dos edifícios foi feita por Vinícius, o qual chegou a antecipar a maquete com que trabalharíamos depois no laboratório. O estudante fotografou seu chapéu refletido em uma lixeira cromada no *hall* de entrada da Caixa Econômica, um dos sítios visitados, para mostrar como a imagem era distorcida nos espelhos cilíndricos (figura 40).

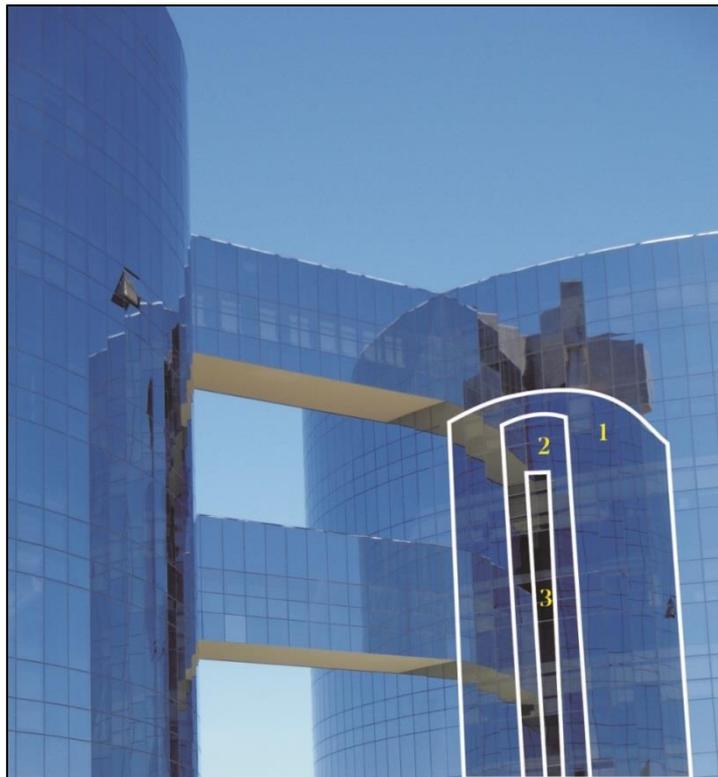
Durante a visita de campo, também foi possível estabelecer junto aos estudantes uma comparação da associação de espelhos planos paralelos e espelhos cilíndricos convexas de eixos paralelos, como no caso da PGR. Quando os espelhos são planos, forma-se um “túnel” de imagens de mesmo tamanho, mas que são visualizadas cada vez menores por estarem mais distantes do olho do observador. Ainda assim, o número de imagens observadas é bastante significativo. Já no caso da PGR e da maquete representativa, esse “túnel” de imagens é comprimido, devido às características astigmáticas da imagem, permitindo que poucas imagens sejam observadas (figura 41).

Figura 40. Chapéu refletido em uma superfície cilíndrica espelhada.



Fonte: fotografia obtida por Vinícius (participante da pesquisa).

Figura 41. Imagens múltiplas na PGR. As regiões 1, 2 e 3, delimitadas pelas linhas brancas, são as três imagens mais visíveis.



Fonte: fotografia e edição do autor (2018).

Por fim, vale lembrar a resposta de Raul, a qual muito nos satisfaz. Para o estudante, não apenas a visita de campo propicia perceber uma aplicação da teoria, mas também a atividade laboratorial:

Raul: *Para as duas, [a vantagem é] a visualização do que realmente é a teoria, na prática. Nenhuma é mais vantajosa. É que tem uma relação entre dois pontos diferentes, né? No objeto [da visita de campo] você está ali, sem ser na maquete, na realidade, você está ali observando o que aconteceria com você vendo e, na maquete, você pode ver de ângulos diferentes, isso.*

7.4.3. Internalidade

Um fator destacado pelos alunos sobre as vantagens da visita de campo foi a internalidade, a qual se pode definir a partir da fala de Clarice: “[na visita de campo], você consegue se inserir naquele meio”. Ou seja, durante a visita, o estudante interage de forma mais direta com o fenômeno, sem filtros teóricos ou experimentais. Segundo Carlos, essa internalidade tem uma vantagem intrínseca:

Carlos: *Perceber com detalhes e clareza na realidade aquilo que você não conseguiria vivenciar no laboratório...*

A internalidade também pode ser compreendida como a possibilidade que o próprio estudante tem de alterar a percepção do fenômeno:

Cecília: *Eu acho que [na visita de campo] você pode interagir mais. Tipo assim... Você pode olhar por ângulos diferentes.*

A limitação de uma maquete como representação de uma situação real também foi destacada, por exemplo, nas falas das alunas a seguir:

Cecília: *Você conseguia enxergar outros fenômenos que em uma maquete você não conseguiria.*

Professor: *É, não dá...*

Clarice: *É, não dá para perceber o eco na maquete, sem dúvida!*

7.4.4. Externalidade

Embora a maquete não tenha as características de internalidade ao fenômeno destacadas no item anterior, os estudantes destacaram aspectos que foram agregados como a externalidade, ou seja, uma visão externa do fenômeno, propiciada pela manipulação do modelo experimental. Érico, ao discorrer sobre as vantagens da maquete, destacou essa característica: “o todo, você vê o todo, assim, o esquema todo”.

Em suas falas, os estudantes Clarice e Manuel compararam a externalidade da maquete com a internalidade da visita de campo:

Clarice: *Eu acho que é muito importante, porque na maquete, a gente vê de fora, né? A gente vê por cima, pelo lado, mas só que lá a gente está literalmente no meio [da situação].*

Manuel: *Você consegue ver muito mais variação [com a maquete], digamos... A gente pode brincar de Deus e mexer nas coisas aqui.*

Cecília utilizou um argumento semelhante, comparando as formas diferentes de interação com o fenômeno que a visita de campo e a maquete permitem:

Cecília: *Na maquete, também [há interação], mas você não está lá mesmo, sabe? Você pode ter uma ideia da situação, mas é uma ideia simplificada. Mas, na maquete, você pode ver o ambiente por cima. Uma visão aérea, assim. Tem essa vantagem.*

A maquete como uma visão aérea do sítio arquitetônico também foi destaque na fala de Luís:

Luís: *E acaba que você tem uma visão de cima da coisa. Você consegue ver todos os ângulos que você estaria vendo lá, e alguns ângulos didáticos, que você não consegue ver lá.*

A analítica fala de Fernando a seguir mostra as vantagens de se analisar um objeto em escala reduzida:

Fernando: *A maquete é mais manipulável. É portátil. Quando você tem um espaço de teste muito grande, você não consegue manipulá-lo para observar todos os fenômenos ópticos, a não ser que você vá até a maquete. Então, assim, a maquete, por ser menor, ela atende mais as suas necessidades para mostrar e observar os fenômenos ópticos. Você pode observá-los melhor.*

A facilidade para movimentação, permitindo que o observador analise a situação por diferentes pontos de vista sem a necessidade de grandes deslocamentos espaciais, também está vinculada à externalidade, como as falas a seguir apontam:

Érico: *É importante também porque a gente consegue observar muita coisa aqui com mais facilidade, porque a gente tem uma maior mobilidade em relação [à visita].*

Clarice: *Eu acho que, pela movimentação da maquete, para você conseguir enxergar ela de vários ângulos diferentes, colocar uma passarela no meio limitaria muito isso.*

Érico: *Com a maquete, você consegue observar bem as coisas, porque ela é o micro representando o macro. Então, no caso, você tem uma visão muito ampla do local, você não precisa se deslocar tanto quanto na vida real.*

Apesar de ser uma representação, a maquete apresenta a vantagem de ser mais fiel ao fenômeno observado do que um esquema geométrico representativo, conforme Jorge argumenta:

Jorge: *Tipo, na maquete você consegue visualizar melhor como isso acontece, porque é uma coisa mais palpável, né, que um conceito no quadro, como um mero esquema geométrico.*

7.4.5. Representação

Na pergunta 33 do protocolo de pesquisa, indagamos aos alunos se a maquete representava bem a realidade e pedimos sugestões sobre aquilo que poderíamos alterar para melhorar essa representatividade. As opiniões se dividiram, com quatro referências tanto à adequação quanto à inadequação.

Um ponto levantado pelos estudantes Fernando, Luís e Jorge, quase em uníssono, foi a ausência da passarela de interligação (“ponte”) entre os edifícios na maquete (ver figura 41). Essa passarela também é revestida por vidros espelhados e poderia ser aproximada por um espelho plano na maquete.

Argumentamos que a visualização das imagens múltiplas ficaria ainda mais complicada, daí a ausência do elemento. Lamentamos informar que não tivemos a ideia de fazer a representação da passarela naquele momento com algum espelho plano disponível, perdendo assim a oportunidade de investigar como os estudantes responderiam à modificação. Vinícius, apesar de considerar que a maquete representa bem a realidade, sugeriu uma modificação ainda mais ousada:

Vinícius: *Bastante bem, se houvesse vários dos prédios planos assim... Seria perfeito, que nem esse.*

A expressão “que nem esse” se refere a um prédio lateral do complexo da PGR, não espelhado, mas cuja projeção aparecia no mapa usado como base da maquete. O estudante, em momento posterior, usou um estojo para representar o edifício.

Clarice, por sua vez, foi elogiosa da representação:

Clarice: *Eu achei que representa [bem]. Você até escolheu uma latinha maior do que a outra. Eu percebi!*

Essa colocação da estudante, entretanto, nos causou estranheza, pois como podemos ver na figura 42, as lixeiras são idênticas em tamanho. Acreditamos que Clarice teve essa percepção equivocada devido ao formato das tampas, que faz com que a lixeira da direita pareça maior que a da esquerda.

Figura 42. Lixeiras usadas como representação dos edifícios da PGR.



Fonte: fotografia do autor (2015).

Outro estudante foi bem mais crítico ao analisar a maquete:

Érico: No caso... Os espelhos não são tão bons... [...] A desvantagem é que ela vai ter algum errinho, porque é uma maquete. Não tem como evitar.

Cecília também notou que a maquete não representava perfeitamente a realidade:

Cecília: E também, assim, lá [na visita de campo] você podia ver ao mesmo tempo em alguns lugares a reflexão normal, assim, reflexão especular, e também a reflexão difusa, porque em alguns lugares a imagem está assim, muito boa e nitidazinha, mas em outros estava superbagunçada, por causa do vento, e aqui não dá para reproduzir (risos).

As críticas à qualidade da superfície refletora das lixeiras citadas pelos dois estudantes se justificam: esses objetos são cromados, com refletividade inferior à de um espelho comum, e possuem pequenas irregularidades (pontos onde a superfície é protuberante ou afundada). Ao contrário, as janelas dos edifícios da PGR são revestidas por películas refletoras planas, as quais se compõem de três camadas de óxido de prata, material de alto custo com grande refletividade. O processo construtivo da obra também levou a uma regularidade no todo da superfície que uma lixeira não poderia igualar. Contudo, lembramos o exposto na revisão bibliográfica dessa tese (capítulo 3): atividades experimentais didáticas no ensino médio, especialmente aqueles construídos pelo próprio docente, tendem a se valer de materiais mais baratos.

Consideramos que o segundo comentário de Érico é mais interessante: o estudante reconhece as limitações da construção de um modelo em escala reduzida. A representação da realidade envolve sempre alguma simplificação, mesmo (e principalmente) na construção de modelos científicos. Como já dissemos, buscamos evitar o termo “modelo” para se referir às maquetes, mas a fala do estudante tornou esse paralelo entre os dois conceitos inevitável.

7.5. Conceitos de Óptica Geométrica

Desde o início dessa pesquisa, já considerávamos que deveríamos analisar aspectos da aprendizagem de alguns temas da Óptica, mas não desejávamos que essa fosse a única preocupação da pesquisa. Daí termos evitado uma tradicional metodologia de pesquisa em Ensino de Ciências, baseada em pré-testes e pós-testes, a qual usamos na nossa dissertação de mestrado. Tal metodologia é bastante adequada para identificar a aprendizagem de conceitos específicos, mas como essa não era nossa única preocupação nessa pesquisa, decidimos por não adotá-la ainda na gênese desse trabalho.

Percebemos, contudo, que se não oferecêssemos uma análise da aprendizagem específica dos temas da Óptica que trabalhamos, estaríamos desperdiçando uma oportunidade e até mesmo nos negando a responder nossa pergunta inicial, apresentada na introdução.

Como já mostramos nos itens anteriores desse capítulo, nosso trabalho permitiu discussões como a implementação da reconceitualização de atividades experimentais, a emergência de situações que levem à aprendizagem colaborativa, a comparação entre práticas distintas de experimentação (maquetes e visitas de campo) e as oportunidades de ensino no espaço urbano, mas tais discussões tiveram como base as atividades pedagógicas que desenvolvemos para trabalhar temas específicos da Óptica. Ou seja, esses conceitos formaram o substrato sobre o qual as outras discussões se enraizaram, e não apresentar ao menos uma análise preliminar de como esses conceitos físicos foram ou não compreendidos pelos estudantes empobreceria essa tese.

É notável que esse tenha se revelado o viés de análise com maior número de referências. Esse resultado, entretanto, não foi inesperado, pois a pesquisa aqui relatada é, no fundo, a análise de momentos pedagógicos – ou seja, um conjunto de aulas. E nos parece inviável que em aulas de Ciências no Ensino Médio possamos nos furtar a trabalhar algum conteúdo programático. Assim, justifica-se a maior frequência de falas

dos estudantes como referências diretas aos temas da Óptica em relação ao desenvolvimento de um novo olhar sobre o espaço urbano, por exemplo. O quadro 10 apresenta o total de referências identificadas em cada subcategoria.

Quadro 10. Número de referências aos conceitos da Óptica Geométrica.

Categoria	Total de referências
Conceitos de Óptica Geométrica	168
Fenômenos ópticos	77
Reflexão	65
Reflexão especular	13
Reflexão difusa	4
Convergência	17
Divergência	31
Outros	12
Astigmatismo	8
Refração	3
Difração	1
Absorção	0
Superfície refletora	33
Espelho plano	2
Espelho curvo	20
Espelho côncavo	3
Espelho convexo	17
Associação de espelhos	11
Imagem	58
Orientação	3
Natureza	9
Posicionamento	14
Tamanho	32

Fonte: quadro do autor, a partir de planilha gerada pelo aplicativo *webQDA*.

7.5.1. Fenômenos ópticos

Apesar das atividades pedagógicas desenvolvidas durante a pesquisa lidarem com a reflexão luminosa, percebemos que outros temas poderiam ser levantados por nós ou pelos estudantes, em especial a refração da luz. No tocante à reflexão, concentramos nossa atenção na diferenciação entre reflexão especular e difusa, assim como entre a convergência e divergência de feixes de luz.

Foram identificadas 65 falas referentes à reflexão e 12 acerca de outros fenômenos. Chamou a atenção não termos identificado nenhuma menção à absorção da luz, indicando que os estudantes não consideraram as superfícies espelhadas como capazes de absorver a radiação luminosa. Frisa-se que os espelhos cotidianos não são ideais, ou seja, sempre apresentam uma refletância inferior a 100% ³⁴, indicando que alguma luz é sempre absorvida.

7.5.1.1. Reflexão

Os principais conceitos da Óptica Geométrica que trabalhamos nas atividades dessa tese estão ligados à reflexão luminosa, portanto era esperável que um maior número de falas dos estudantes se referisse a esse tema.

Em especial, a atividade permitiu que os estudantes percebessem algumas propriedades da reflexão especular que são discutidas apenas *en passant* em sala de aula, devido à tradicional falta de tempo para aprofundamento em um tema. Por exemplo, a propriedade da reversibilidade de um raio de luz, ao incidir perpendicularmente em um espelho, esteve presente no excerto abaixo, enquanto os estudantes desenhavam um esquema geométrico para a formação da imagem em um espelho convexo:

Professor: [...] Se vocês quiserem desenhar só dois ou três raios já está bom. Pode também desenhar vários.

Fernando: *Esse aqui, no caso, você fez voltando como? Porque ele volta do mesmo jeito, né?*

Professor: É, o [raio que passa pelo] centro, ele vai voltar [pela mesma trajetória]. É que nem aquele princípio do espelho, quando você faz...

Fernando: *Perpendicular, ele bate e volta...*

Luís: *Bate, volta. Aí, então, não precisa desenhar.*

³⁴ Hetch (2002) nos diz que a prata, material bastante utilizado em películas espelhadas, tem uma alta refletividade (entre 95% e 99%) entre o infravermelho e o verde, mas apresenta uma refletividade inferior a 90% nas regiões do azul e do violeta do espectro eletromagnético.

Outra oportunidade para a apresentação de conceitos não tradicionalmente discutidos em aulas sobre a reflexão luminosa esteve presente nessa fala de Vinícius, onde ele percebe as limitações de se aproximar um sistema de espelhos planos por um convexo:

Professor: Então, porque aqui, primeiro, esses prolongamentos de raios se formam aí? Essas manchas no chão?

Vinícius: *Não seria um raio se fosse perfeitamente cilíndrico, porque aí seria só um... Uma faixa.*

Jair: Isso... É porque são janelas na...

Vinícius: *São janelas, cada janela reflete, não é de um ângulo, um pouco mais diferente.*

Ou seja, o estudante pôde perceber que as manchas de luz no gramado da PGR, causadas pela reflexão especular nas janelas planas do edifício não estariam presentes caso o espelho fosse um cilindro perfeito. Essa é uma limitação pouco discutida da Óptica Geométrica, até mesmo nos livros didáticos: o modelo dos raios de luz os concebe como unidimensionais. Somente imaginando um número infinito desses raios poderia explicar a produção da “faixa” citada pelo estudante.

A visita de campo se revelou um momento importante para mostrar que tanto a reflexão especular quanto a difusa pode ocorrer em uma superfície. Em uma das nossas notas de campo, conversamos com Vinícius sobre duas fotos que ele havia tirado da fachada do Itamaraty refletida no espelho d’água (figura 43).

Figura 43. Reflexão da fachada do Palácio do Itamaraty em dois momentos, com maior nitidez da imagem na fotografia à esquerda.



Fonte: fotografias obtidas por Vinícius (participante da pesquisa)

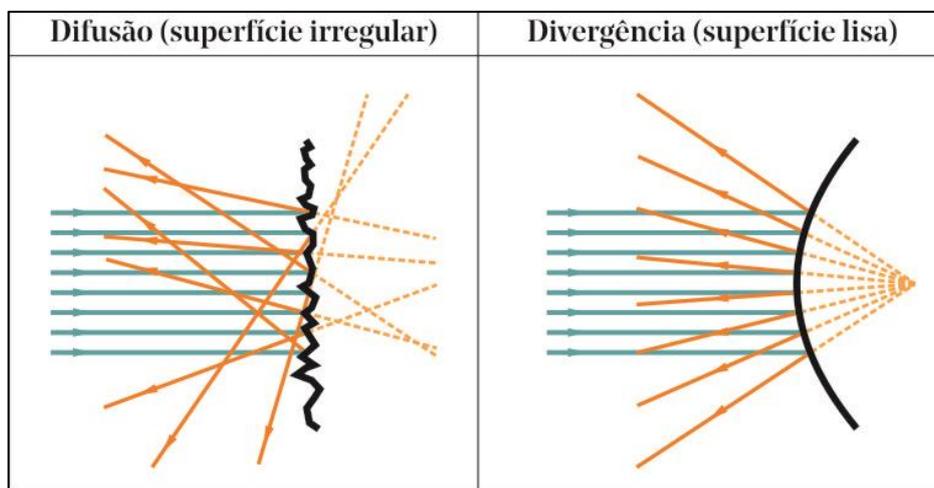
A primeira fotografia, à esquerda, mostrava alguns pilares da fachada refletidos com alguma nitidez, enquanto na segunda fotografia, à direita, não era possível observar nenhuma imagem no espelho d'água. O aluno ficou intrigado pelo fato de, em sua fala, não ter se passado nem mesmo “um segundo” entre os instantes em que as fotografias foram captadas e o ângulo de visão ter sido praticamente o mesmo. Pude então discutir com o estudante sobre as condições de regularidade da superfície para que uma imagem nítida, resultante da reflexão especular, pudesse ser observada.

Durante a atividade laboratorial, pudemos também perceber um erro conceitual que não havíamos identificado até então na nossa prática profissional: a confusão entre os conceitos de *reflexão difusa* e *divergência* da luz (figura 44). Como exemplo, temos a fala a seguir:

Professor: Mas por que o formato do espelho distorce, transforma [a imagem em] uma linha reta?

Raul: *Porque a luz deve bater no espelho e dispersar para o lado. Deve bater e refletir como no espelho plano, se é que é meio reflexão difusa, sim, só que...*

Figura 44. Comparação entre a reflexão difusa da luz em uma superfície irregular com a reflexão especular divergente em uma superfície convexa lisa. Os raios de luz incidentes estão em azul, os refletidos estão em laranja e os prolongamentos dos raios refletidos estão tracejados.



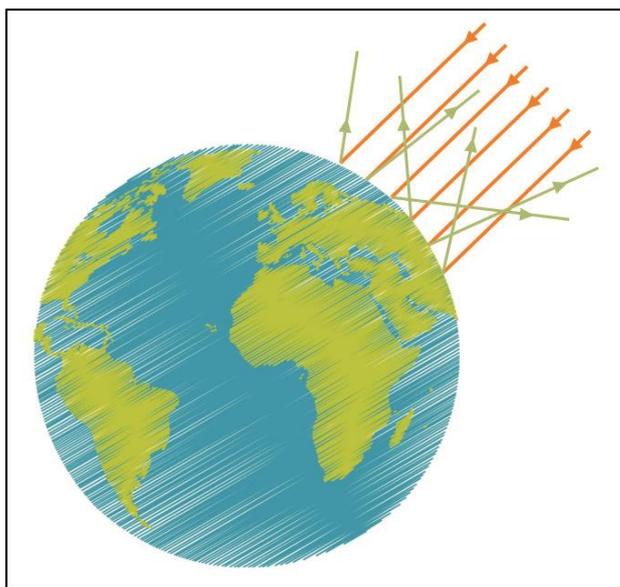
Fonte: desenho do autor (2019).

Em uma superfície irregular, como uma parede, um feixe de raios paralelos que se reflita irá se difundir, ou seja, será refletido em direções tão diversas que não se poderá pensar em um cruzamento único de raios ou prolongamentos destes. Nessa situação, não se forma uma imagem. Já em uma superfície lisa e convexa, como um

espelho, a luz sofre uma reflexão especular e o feixe de raios emerge divergente, mas seus prolongamentos se unem em um ponto onde se pode observar uma imagem³⁵.

Carlos, por exemplo, atribuiu as imagens distorcidas nas lixeiras e na PGR à reflexão difusa da luz e não à divergência na superfície convexa regular. Quando perguntado sobre onde haveria reflexão difusa, o aluno não soube indicar, sendo necessária nossa intervenção para corrigir a fala. Fato semelhante ocorreu quando Cecília e Clarice, ao começarem a construir um esquema para mostrar como a imagem era formada no espelho convexo, compararam a reflexão da luz neste espelho com um desenho esquemático que o professor de Geografia da escola lhes teria apresentado em uma aula (figura 45), o qual mostrava a difusão da luz refletida pela atmosfera e superfície do planeta. Novamente, intervimos para evitar essa incorreção.

Figura 45. Reflexão difusa da radiação solar na atmosfera e superfície do planeta Terra. Os raios incidentes são mostrados em laranja e os refletidos em verde.



Fonte: desenho do autor (2019).

A divergência esteve bem mais presente nas falas dos estudantes do que a convergência. A análise das falas mostrou, entretanto, que embora os alunos conhecessem a diferença entre raios de luz e prolongamentos de raios (conforme evidenciado no questionário virtual prévio às atividades experimentais), tais termos eram por vezes utilizados como sinônimos, como nos exemplos a seguir:

³⁵ A formação dessa imagem, na forma mostrada na figura 27, envolve algumas considerações de aproximação.

Cecília: É porque, tipo assim, eles estão um de frente para o outro. Aí, aqui, os raios estão paralelos; eles se formam através do espelho, eles vão em direção do foco, todos. A gente podia fazer a mesma coisa, só que com mais de um raio de luz sendo emitido.

Jorge: Saem do objeto, vão convergir aqui no foco, e o prolongamento para cá. Só que quando você muda a Óptica, ele vai corrigir o foco, só que em um ponto diferente...

No caso acima, Cecília falou em raios que “se formam através do espelho” e “vão em direção do foco” (o qual estava atrás da superfície refletora), indicação de que a aluna estava, na verdade, referindo-se aos prolongamentos. Jorge também confundiu os conceitos na sua fala, informando que os raios de luz iriam convergir no foco e seus prolongamentos em outro ponto, fato geometricamente impossível. Ao indagarmos Jorge sobre como isso seria possível, seu colega Luís complementou e corrigiu seu pensamento, informando que, na verdade, Jorge estava pensando na imagem se formando no foco, e não na convergência de raios.

Outro aspecto interessante que também não tínhamos percebido em nossa prática didática foi a possibilidade dos estudantes de encararem a divergência como um resultado da convergência luminosa. Por exemplo, quando questionamos Vinícius sobre as visões aéreas da PGR, nas quais manchas de luz divergentes eram observadas no gramado, obtivemos a seguinte resposta:

Professor: Como é que você descreveria esses raios em termos ópticos? Eles estão se afastando, se aproximando, se concentrando?

Vinícius: Concentram-se no centro... E se afastam.

O mesmo estudante complementou a frase logo a seguir, considerando a divergência luminosa como a responsável pela imagem distorcida observada na superfície cilíndrica:

Vinícius: Que todos os feixes de luz, à medida que vão se afastando do centro, vão tendo um ângulo maior. Então, vão criando uma distorção. [...] À medida que vai se afastando do centro, os feixes vão mantendo ângulos maiores; então, isso vai causar uma deformação da imagem do objeto.

As duas falas anteriores contém um erro conceitual importante: o papel atribuído ao centro do espelho como local aonde os raios convergem ou a partir do qual divergem. O ponto correto é chamado foco. Vinícius não foi o único estudante a cometer tal engano, indicando que a confusão entre os papéis desses dois pontos geométricos deveria ter sido uma preocupação maior nossa.

7.5.1.2. Outros fenômenos

O astigmatismo (deformação da imagem) é um fenômeno sempre presente em superfícies cilíndricas, seja nos edifícios e lixeiras que usamos para trabalhar com a reflexão luminosa, seja nas lentes cilíndricas utilizadas para corrigir o problema de refração da visão humana conhecido também por astigmatismo. A atividade experimental se revelou uma boa oportunidade para discutir esse fenômeno, o qual é considerado tecnicamente como uma aberração monocromática.

A dependência da posição do observador para identificar a imagem deformada por astigmatismo foi notada por Raul:

Professor: Mas essa é a maneira que uma pessoa que tem astigmatismo enxerga. [...] Ela olha para um objeto em posições diferentes e ela vê o objeto deformado. Isso aí é o astigmatismo. O que você acha que produz essa deformação?

Raul: *Porque, como ele [o espelho] é cilíndrico, no caso não é todo lugar que ele vai te dar deformação.*

O estudante chegou à conclusão acima após observar um semicírculo de pontinhos coloridos refletido pela superfície da lixeira. Ao mudar de posição, observando primeiro a imagem a partir da superfície da mesa e depois de um ponto de visão mais alta, Raul nos informou que a abertura da imagem refletida diminuía e aumentava, dependendo da posição em que ele estava.

Outro fenômeno luminoso que os estudantes puderam perceber durante as atividades e que não fazia parte do nosso objeto de pesquisa foi a refração, um fenômeno quase indissociável da reflexão, ao nível de formulações mais complexas da Óptica tratarem os dois fenômenos por um único pacote matemático. Assim, esperávamos que os estudantes pudessem também perceber algum fenômeno refrativo, em especial durante a visita. Por exemplo, ao ser questionada sobre os fenômenos observados na PGR, Cecília se lembrou de que havia pensado em refração ao olhar para as fachadas:

Cecília: *É porque eu achei, assim pode ser que seja refração mais ou menos assim de tarde que dá para ver sei lá imagem refletida pelo lado de fora, mas também dá para ver do prédio porque uma parte da luz é refletida e outra é refrata aí dá para ver lá dentro. Mas, de dia, todas as janelas estavam refletidas.*

A diferenciação entre os dois fenômenos não é tão óbvia quanto se pode pensar: na visita de campo, Vinícius fotografou o reflexo do edifício-sede da Caixa refletido no

espelho d'água, indicando para nós que o fenômeno representado se tratava de uma refração, em um erro bastante comum. Outro fenômeno luminoso citado de forma errônea foi a difração, que Carlos disse ter percebido na visita à PGR. Acreditamos que o aluno confundiu a difração com a reflexão difusa ou mesmo com a divergência observada na radiação solar após reflexão especular nas janelas dos edifícios.

7.5.2. Superfícies refletoras

Nosso trabalho lidou em especial com uma associação de dois espelhos convexos cilíndricos, tanto na visita de campo quanto no trabalho laboratorial. Assim, o maior número de codificações das falas dos estudantes sobre essas duas características (associação e convexidade) das superfícies refletoras já era esperado.

Vale ressaltar que alguns estudantes conseguiram ir além dessas percepções iniciais: Luís, por exemplo, descreveu corretamente a lixeira como um espelho cilíndrico, o qual era “plano na vertical”. Jorge destacou a necessidade de se pensar no “prédio como um todo” para que a classificação do seu formato pudesse ser feita adequadamente, assim como Clarice:

Clarice: Cada espelho é plano, só que eles todos juntos na estrutura do cilindro formam um espelho convexo.

Cecília, por sua vez, percebeu que a associação de espelhos observada na sede da PGR era, no fundo, muito mais complexa que a representada pela maquete:

Cecília: Mas a passarela também seria um terceiro espelho. Vai ficar um espelho aqui, um espelho aqui e outro aqui, aí ficariam mais imagens para ser refletidas.

Nesse quesito de identificação das características das superfícies refletoras, consideramos que a atividade se mostrou bem-sucedida em permitir que os estudantes tivessem tais percepções, inclusive permitindo que Fernando e Manuel, de forma independente, estabelecessem uma comparação do espelho convexo cilíndrico com um espelho côncavo cilíndrico – no caso, o interior da lixeira cromada.

7.5.3. Imagem

A observação de imagens e a construção geométrica destas são indissociáveis da Óptica Geométrica. Após análise das falas, percebemos que as atividades da nossa pesquisa centraram principalmente na natureza real ou virtual da imagem, no seu tamanho relativo em relação ao objeto e no posicionamento desta à frente ou atrás da superfície refletora. A orientação das imagens como direitas ou invertidas não esteve muito presente nas falas dos estudantes, em especial porque espelhos convexos não formam imagens invertidas.

No tocante à natureza virtual das imagens observadas, os estudantes Érico, Manuel e Fernando destacaram que tais imagens eram formadas a partir de cruzamentos imaginários entre os raios (isto é, entre os prolongamentos destes). Nenhum aluno considerou as imagens observadas como reais, embora Vinícius tenha apresentado uma rápida dúvida sobre os cruzamentos dos raios serem reais ou imaginários. Esta dúvida foi sanada rapidamente pelo seu colega Manuel, sem a necessidade da nossa intervenção: “porque onde eles [os prolongamentos] se encontram, estaria dentro do espelho”.

O posicionamento da imagem atrás da superfície espelhada também não foi fonte de conflito. Entretanto, nem sempre os estudantes conseguiram perceber corretamente onde a imagem se formava. Para Carlos, por exemplo, a imagem de um edifício se formava atrás da superfície do outro, mas no foco desta superfície, uma consideração errônea. Já Luís estabeleceu também de forma equivocada que o posicionamento da imagem atrás do espelho dependeria de “irregularidades” que ele considerou existentes na superfície das lixeiras. Segundo o estudante, ao mudar o ângulo de visão, a incidência da luz nessas irregularidades se alteraria e, portanto, mudaria também o posicionamento da imagem.

As falas mais interessantes e frequentes tocaram nos aspectos relativos ao tamanho das imagens. Apesar da observação direta de tais imagens por eles próprios, foi necessária nossa intervenção constante para que eles pudessem perceber que a dimensão vertical das imagens não se alterava na vertical, pois os espelhos eram planos nessa direção.

É compreensível, entretanto, essa dificuldade de perceber que as imagens múltiplas não se alteravam na vertical, pois quanto mais distantes dos nossos olhos, menor elas nos parecem. Cecília só conseguiu perceber essa igualdade na dimensão

vertical do objeto e da imagem com um posicionamento adequado: “de frente, eu vejo com o mesmo tamanho”. Já para Clarice, dois fatores competiam de forma antagônica para que a imagem ficasse do mesmo tamanho:

Clarice: Tipo, ela fica menor, pega um campo de visão maior só que reduzir o tamanho das coisas.

A percepção de que as imagens eram menores que o objeto no plano horizontal foi mais simples. Carlos nos descreveu que, na horizontal, as imagens eram “comprimidas”, indicando que elas eram menores que os objetos. Clarice complementou dizendo que as imagens se “restringiam”. Já Manuel preferiu descrever que na horizontal as imagens formadas eram “elipses” e que a cada reflexão, surgia uma “elipse mais deformada que a primeira elipse”.

8. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

No relato de uma pesquisa científica, não se pode fugir da admissão que o alcance dos resultados encontrados é, por princípio, limitado. Esse exercício de autocrítica e reflexividade é uma das marcas do conhecimento científico, e por essa razão, iniciamos esse capítulo final apresentando as limitações que reconhecemos nesse trabalho.

Uma típica limitação, sempre citada nos relatórios elaborados pelos alunos de graduação nas disciplinas experimentais, é a precisão dos equipamentos de medida. Em outras palavras, aquilo que conseguimos medir ou avaliar depende sobremaneira da forma como decidimos fazer tal medida ou avaliação. No entanto, neste caso, temos que ter clareza que estamos lidando com o ensino de Ciências e não fazendo Ciência. Desta forma, a importância não está na precisão das medidas realizadas, mas sim na sua relevância para a aprendizagem de conceitos científicos.

No caso da pesquisa aqui relatada, essa limitação transparece tanto na metodologia de geração dos dados quanto na análise dos mesmos. A metodologia foi influenciada de maneira inescapável pela nossa prática docente prévia e, portanto, reflete algumas das nossas idiosincrasias. A própria escolha da experimentação como prática pedagógica é um exemplo idiosincrático, pois, como já relatamos, atividades experimentais em sala de aula também formaram o substrato do nosso estudo para o mestrado, concluído em 2010.

Em termos didáticos, existe uma grande diversidade de métodos que poderiam ser adotados para a abordagem da reflexão luminosa, conforme nossa revisão bibliográfica demonstrou. Ainda que nossa opção pelo trabalho experimental tenha sido idiosincrática, vale notar que essa prática é uma constante nas investigações sobre a aprendizagem de temas da Óptica. Ainda assim, para fugirmos dessa limitação, decidimos pela adoção complementar de uma prática de ensino que nunca tínhamos nos valido até então, as visitas de campo. A incorporação de uma estratégia didática usual (experimentação) em contraste com uma estratégia não tão habitual (visita de campo), ao menos no tema em questão, permitiu que nossas atividades experimentais não tenham sido apenas um “fim em si mesmo”.

Essa opção pela fuga da “zona de conforto” nos trouxe alguma paz no tocante à metodologia de geração de dados. Não obstante, ela também foi uma escolha pessoal.

Ou seja, dentre o ferramental de possibilidades de geração de dados, tivemos que optar por algumas ferramentas a partir da nossa vivência docente, mas consideramos essa uma limitação inevitável de pesquisas desenvolvidas em ambientes escolares pelo próprio docente.

Ainda no tocante à metodologia, admitimos que o número de participantes (dez), embora tenha parecido adequado tanto para nós quanto para os membros da banca de qualificação, poderia ter sido mais amplo e diversificado. Gostaríamos, em particular, de ter aplicado a mesma metodologia com grupos de alunos na instituição pública a que pertencemos hoje, o Instituto Federal de Brasília (IFB), talvez para fins de comparação de resultados.

Tal possibilidade, infelizmente, não se revelou possível, pois nossa entrada nessa instituição ocorreu apenas no ano de 2018, quando a tese já estava bastante adiantada e o volume de trabalho extraclasse nessa nova instituição nos tomou de assombro. Admitimos que a geração de um novo conjunto de dados faria com que a pesquisa ganhasse ainda mais contornos, pois o contexto pedagógico de uma escola pública de ensino técnico é bastante diferenciado de uma escola particular. É nosso desejo, contudo, aplicar e melhorar essa proposta de ensino com os alunos do IFB após a conclusão dessa tese. Paraphrasing Cazusa, uma pesquisa não para.

No tocante à análise, uma restrição também pode ser encontrada na gama de possibilidades de referências teóricas. Visões de mundo diferentes poderiam trazer à tona, a partir dos mesmos dados gerados, percepções complementares àquelas que construímos. Essa multiplicidade de geração de “mundos possíveis” a partir dos mesmos dados nos mostrou que a prática da análise qualitativa pode se revelar mais complexa que uma análise quantitativa centrada em modelos estatísticos, com a qual possuíamos mais familiaridade. Nesse momento, ao continuamente revisarmos e reescrevemos o texto aqui presente, percebemos o quanto a análise que desenvolvemos se revela um inesgotável exercício argumentativo, no qual estamos sempre buscando apresentar mais elementos que suportem a validade da tese.

Cabe, inclusive, lembrar aqui os objetivos gerais da nossa pesquisa, aqueles que se cumpridos, apontam na direção da validade da tese. Nosso primeiro objetivo era analisar se o trabalho pedagógico que desenvolvemos a partir da sede da PGR poderia contribuir para a aprendizagem do tema da reflexão luminosa no Ensino Médio.

Para a verificação desse objetivo, destacamos o viés de análise ligado à reconceitualização do trabalho experimental. Conforme destacamos na análise, nossa

proposta permitiu que os estudantes elaborassem descrições dos fenômenos refletivos observados, construíssem hipóteses explicativas para os mesmos, experimentassem de forma espontânea no próprio campo ou com o uso da maquete, conseguissem estabelecer vínculos entre a teoria e realidade, confrontassem seus esquemas geométricos e manifestassem suas ideias prévias ou reelaboradas sobre tais fenômenos. Entendemos, portanto, que a proposta logrou sucesso nesse objetivo.

Nesse ponto, deve-se levar em conta a supracitada complexidade de uma análise qualitativa. O jargão “isso não é uma Ciência exata” é quase inevitável aqui. Não estamos lidando com significâncias estatísticas, por exemplo, e sim mostrando que nossa proposta levou à existência de situações potenciais de aprendizagem. Nossos objetivos não incluíam a comprovação de que as técnicas pedagógicas que apresentamos são superiores às demais, até porque discordamos dessa afirmação. Não vemos uma supremacia da experimentação ou das visitas de campo sobre as demais práticas pedagógicas, mas acreditamos ter jogado luz sobre o potencial dessas técnicas didáticas na nossa análise.

Ainda sobre esse objetivo geral, a ampla revisão teórica que conduzimos acerca da reflexão luminosa fez com que percebêssemos que não há mais carência por sugestões de atividades experimentais para a sala de aula. Nossa revisão se iniciou com artigos publicados em 1995, antes da popularização da internet. Nessa época, era possível argumentar que professores não trabalhavam com a experimentação em sala de aula por não conhecerem atividades experimentais adequadas. No momento atual, essa argumentação não se sustenta, pois há, literalmente, centenas de artigos propondo atividades experimentais sobre o tópico que trabalhamos (reflexão luminosa), evento que se repete em outros tópicos da Física. O advento do *YouTube* e das redes sociais facilitou ainda mais que um professor possa tomar contato com atividades experimentais diferenciadas. Podemos dizer que, nas duas últimas décadas, o problema se deslocou de *como* experimentar a *por que* experimentar.

Nosso segundo objetivo geral era o desenvolvimento de uma nova maneira de olhar a cidade por parte dos estudantes, permitindo diagnosticar novas maneiras de se aprender com a cidade, *i.e.*, contribuir para o desenvolvimento de uma interpretação diferenciada da cidade e das estruturas arquitetônicas a partir do ensino de temas da Óptica. Consideramos que esse objetivo também foi atingido a contento na nossa proposta de ensino, pois conforme relatamos na análise, os estudantes foram unânimes em afirmar que sua visão sobre a cidade havia se modificado, em especial porque eles

havam compreendido que teorias físicas podiam ser aplicadas na interpretação das estruturas arquetônicas.

Tais relatos são animadores, pois como frisamos diversas vezes ao longo desse texto, entendemos uma cidade como uma grandiosa superfície coberta por propostas para a aprendizagem de diferentes tópicos da Ciência. Nesse contexto, mal chegamos a arranhar tal superfície. Nossa pesquisa se concentrou apenas em um tema da Óptica Geométrica, mas durante a realização da mesma, percebemos o quanto ela também poderia ter sido enriquecedora em áreas como transmissão de calor, análise estrutural ou ondas sonoras. É inevitável sugerir que tais tópicos possam vir a transparecer em nossas pesquisas futuras.

Cabe aqui verificar também se os objetivos específicos que atribuímos a essa pesquisa foram atingidos, seja no todo ou em parte. Nosso primeiro objetivo específico visava à identificação de quais conceitos de reflexão luminosa poderiam apresentar entraves para os estudantes. Conforme evidenciamos na análise dos dados, a identificação das ideias prévias nos chamou a atenção para o fato dos estudantes atribuírem um papel muito importante ao centro de um espelho curvo, confundindo suas propriedades com aquelas que, na realidade, pertencem ao foco dessa superfície. Essa constatação não chega a ser estarecedora para professores de Física no Ensino Médio, mas é interessante contrastá-la com os resultados da revisão bibliográfica, na qual não foi identificado nenhum trabalho que lidasse com tal entrave para a aprendizagem.

Outro ponto que percebemos como sensível foi a diferenciação entre reflexão difusa e especular. A princípio, essa comparação seria um tema simples para os estudantes, ao nível dos livros didáticos sempre a apresentarem de forma bastante sucinta. Entretanto, percebemos na nossa pesquisa que os estudantes confundem a difusão quase aleatória da luz refletida em uma superfície irregular com a divergência regular da luz refletida em uma superfície curva espelhada. Novamente, não encontramos na literatura revisada artigos que lidassem com essa falha no entendimento, fato que nos estimula a uma futura expansão da nossa pesquisa.

A análise também mostrou que os estudantes confundiram a reflexão e seus efeitos como outros fenômenos, tais como a refração ou a difração da luz, algo que nos causa preocupação, pois na linguagem cotidiana, só ouvimos que a luz “refletiu” em algum lugar (por exemplo, não é incomum que um aluno nos diga que o céu é azul porque “reflete o azul”), mas não que ela se refratou, difratou, dispersou ou sofreu espalhamento. A troca entre os conceitos de reflexão e refração é algo que já havíamos

percebido na nossa prática docente diária, mas foi interessante que a pesquisa a tenha evidenciada, novamente apontando um caminho futuro possível de continuação do trabalho aqui relatado.

Ainda no tocante aos entraves, mas agora focando na sua minimização, temos uma boa notícia: uma lixeira espelhada é uma prática e barata ideia para representar o astigmatismo visual. A análise mostrou que os estudantes, em especial aqueles que têm esse problema refrativo ocular, conseguiram estabelecer vínculos entre o problema visual e as imagens observadas na superfície desses prosaicos objetos.

Tínhamos também como objetivo fazer um levantamento das opiniões dos estudantes sobre a atividade experimental desenvolvida a partir de uma estrutura urbana. Conforme relatamos na análise, as opiniões e sugestões que os estudantes fizeram após as atividades destacaram a internalidade da visita de campo (observador imerso no fenômeno) e a externalidade do trabalho com as maquetes (observador externo ao fenômeno).

Entender um observador como interno ou externo àquilo que ele analisa é uma questão epistemológica complexa e que foge ao escopo dessa tese. Podemos pensar, assim, não apenas em internalidade ou externalidade, mas também como um problema de escala: na visita de campo, as dimensões das estruturas arquitetônicas possuíam ordem de grandeza bastante superior às dimensões dos observadores (estudantes), enquanto no trabalho com as maquetes essa relação se inverteu.

Ambos os pontos de vista são desejáveis, trazendo vantagens e desvantagens intrínsecas, relatadas no capítulo anterior. Contudo, conforme nossa revisão bibliográfica nos permite afirmar, visitas de campo são raras no Ensino de Física, enquanto o trabalho com atividades experimentais em menor escala é bastante frequente. Mesmo quando uma visita de campo é organizada no Ensino Médio, não é improvável que ela se componha de uma visita a um museu de Ciências ou a uma experimentoteca universitária – ou seja, situações nas quais a ordem de grandeza do observador é mais significativa. É óbvio que não somos contra tais visitas, mas esperamos que o nosso trabalho possa inspirar professores de Física a buscarem “soluções fora da caixa” ao elaborarem uma visita de campo.

Nosso terceiro objetivo específico era a verificação de interações espontâneas dos estudantes com as maquetes. Ao concebermos tal objetivo, tínhamos em mente a forma como os estudantes poderiam usar a maquete diretamente para testarem suas próprias teorias ou como auxílio na realização de alguma atividade escrita da pesquisa

(ou seja, um exercício didático). Entendemos que esse objetivo foi apenas parcialmente atingido. Alguns estudantes, em especial Vinícius e Clarice, perceberam que a maquete trazia possibilidades para a experimentação espontânea, mas os demais quase não se valeram da maquete como auxílio para a realização das atividades escritas propostas.

Estipulamos também como objetivo identificarmos a emergência de oportunidades para a aprendizagem colaborativa, tanto na visita de campo quanto nas atividades experimentais no laboratório. Nossa análise permite concluir que ambas as atividades se revelaram propícias ao surgimento dessas oportunidades, mas a colaboração se deu menos entre os estudantes do que esperávamos. Em compensação, observamos diversas oportunidades para colaboração dos estudantes diretamente conosco.

Se tomarmos o conceito da ZDI como âncora, faz sentido que os estudantes tenham buscado nossa colaboração na realização das tarefas, em especial no laboratório. No âmbito da ZDI, é esperada a demonstração de métodos, elaboração de perguntas, fornecimento de informações, correções de caminho, apresentação de exemplos teóricos ou de aplicação de um conceito, incitação à reflexão intelectual e demandas por explicações por parte do aprendiz. Tais práticas são típicas da atividade docente e nem sempre os colegas de um estudante se sentem capazes a desempenhá-las, daí a busca mais frequente pela colaboração do professor.

No contexto particular das atividades didáticas desenvolvidas, devemos admitir que a construção geométrica das imagens observadas na PGR se revelou um interessante exemplo de aplicação do conceito de zona de desenvolvimento iminente. Os estudantes conseguiram fazer sem problemas um esquema representando o que ocorre quando raios de luz paralelos são refletidos por um espelho convexo, *i.e.*, essa tarefa já fazia parte da zona de desenvolvimento atual (real) dos estudantes. Entretanto, quando pedimos que eles esquematizassem a formação da imagem de um objeto curvo (um dos prédios da PGR) refletida em um espelho convexo (o outro edifício), todos os estudantes buscaram a nossa colaboração ou seguiram as dicas de um colega, em um claro exemplo do que está incluído na zona de desenvolvimento iminente.

Após ponderarmos sobre nossos objetivos de pesquisa, resta ainda responder à pergunta central dessa tese: em que medida o desenvolvimento de atividades pedagógicas inspiradas por uma estrutura arquitetônica contribui para a aprendizagem da reflexão luminosa no Ensino Médio? Nossos resultados apontam para várias respostas a essa questão. A nosso ver, a proposta permitiu que a vivência cotidiana dos

estudantes fosse não apenas incluída na aprendizagem do tema, mas também modificada a partir dessa aprendizagem. Esse é um importante diferencial de aprendizagem, defendido inclusive nos documentos oficiais que citamos na introdução.

Uma segunda resposta que aventamos está na possibilidade de se trabalhar com objetos refletores de grande escala (prédios) e pequena escala (maquetes) que os representem, estabelecendo comparações que permitam demonstrar que os princípios da Óptica Geométrica são válidos em ambas as situações. Acreditamos que essa característica do trabalho que realizamos a partir de estruturas arquitetônicas ajudou a demonstrar para os estudantes que a experimentação é uma técnica conveniente para entender o “mundo real”, ao trazê-lo para uma escala mais confortável.

Outra contribuição para a aprendizagem do tema reside na diversidade de técnicas pedagógicas e incomuns ao tema da reflexão luminosa, como saídas de campo, atividades experimentais com maquetes e trabalho com mapas cartográficos, todas elas presentes na nossa proposta. Pode-se ainda citar que o trabalho aqui exposto mostrou também uma revisão das técnicas tradicionais para o ensino da reflexão, como a construção de esquemas geométricos, os quais foram inspirados pelas estruturas, ao invés de serem apresentados de forma descontextualizada. Afinal, se é evidente que cada estudante aprende de forma diferente, aplicar uma maior variedade de técnicas pedagógicas parece ser o caminho desejável para a aprendizagem.

Entendemos também como uma resposta à pergunta central os diferenciais de aprendizagem que a implementação de métodos pedagógicos que fujam da centralidade do professor tende a trazer. Admitimos, entretanto, que embora nossa proposta tenha apontado nessa direção, ainda será árduo o caminho que ainda teremos que percorrer enquanto tentamos deslocar nossas práticas didáticas para um maior protagonismo dos estudantes.

As atividades didáticas que relatamos foram elaboradas a partir do espaço urbano brasiliense. Longe de vermos essa característica como limitante, consideramos que essa é apenas uma primeira possibilidade de trabalho. Entendemos que a proposta pedagógica aqui relatada poderia ser adaptada e contextualizada para outros espaços urbanos, especialmente nas grandes cidades, a partir da diversificação dos modelos construídos para a pesquisa. Ou seja, pode-se partir de uma visita às estruturas de um espaço urbano particular e depois trabalhar com maquetes representativas desses espaços, em um esforço didático de complementaridade.

No tocante às maquetes, entendemos que um natural avanço dessa pesquisa estará em permitir que os próprios estudantes possam construir suas maquetes das estruturas observadas, mesmo com reduzidos níveis de detalhamento. Como já relatamos, nosso desejo era trabalhar com um maior número de maquetes representativas dos sítios arquitetônicos, mas as limitações temporais da pesquisa não permitiram tais arroubos. Nossa intenção, ao longo dos próximos anos, é estruturar um maior número de aulas de Física, não apenas de Óptica, que possam ter a Arquitetura brasiliense ou o seu espaço urbano como ponto inicial de questionamento.

Por fim, esperamos que nossa pesquisa tenha realmente levado os estudantes que dela participaram a reinterpretar a cidade onde vivem, percebendo a mesma como um espaço a ser usufruído. Em especial, esperamos ter despertado os estudantes para as possibilidades de aprendizagem no espaço urbano, as quais nem sempre são aparentes, devido à forma automática e impessoal com que as relações com a cidade são comumente estabelecidas. Por vezes, devido à intensa dinâmica do tempo e do espaço urbano e o veloz ritmo com que as intervenções humanas aparecem e desaparecem da paisagem, um observador pode ser levado a um processo de apatia com relação a tais interferências. Esperamos que nosso projeto tenha sido um contraponto à indiferença e à incompreensão do ambiente urbano.

9. REFERÊNCIAS

- AAD, G. *et al.* Combined measurement of the Higgs boson mass in *pp* collisions at $\sqrt{s} = 7$ and 8 TeV with the ATLAS and CMS experiments. **Physical Review Letters**, v. 114, n. 19, p. 191803, 2015.
- ACIOLI, J. *Física básica para Arquitetura*, 1ª ed., 330p, Brasília: Editora UnB, 1994.
- ADIE, G. Using the laser pointer as a demonstration tool. **Physics Education**, v. 32, p. 190-191, 1997.
- ALLOCCO, M. Puddle of light. **The Physics Teacher**, v. 37, n. 8, p. 468, 1999.
- ALMEIDA, W.; LUZ, F.; SILVA, J.; SILVA, S.; BRINATTI, A. Espelhos esféricos confeccionados com materiais acessíveis para demonstração de formação de imagens em sala de aula. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 30, n. 2, p. 396-408, 2013.
- AMANN, G. An old periscope with a new ‘twist’. **The Physics Teacher**, v. 34, n. 7, p. 408-409, 1996.
- ANASTASSAKIS, E. Physics for architects. **European Journal of Physics**, v.3, n. 4, p. 247-249, 1982.
- ANJOS, I. *Física para o Ensino Médio: volume único*, 1ª ed., p. 259-280, São Paulo: IBEP, 2005.
- ARAÚJO, D.; JESUS, L.; SANTOS, A.; SOARES, V. Ilusões de óptica nas aulas de Física do nível médio: aplicação e resultados. **Física na Escola**, v. 15, n. 1, p. 35-40, 2017.
- ASSOCIAÇÃO INTERNACIONAL DAS CIDADES EDUCADORAS. *Carta das Cidades Educadoras*. Gênova, 2004. Disponível em <<http://www.edcities.org/en/wp-content/uploads/sites/2/2014/03/Charter-in-Portuguese.pdf>>. Acesso: 10/09/2018.
- AVENDAÑO-ALEJO, M.; CASTAÑEDA, L.; MORENO, I. Caustics and wavefronts by multiple reflections in a circular surface. **American Journal of Physics**, v. 78, n. 11, p. 1195-1198, 2010.
- BAIRD, W. Helping the Moon take a selfie. **Physics Education**, v. 49, n. 5, p. 486, 2014.
- BALTA, N.; ERYILMAZ, A. Upside-down image in a spoon. **Physics Education**, v. 46, n. 4, p. 380-382, 2011.
- BAPAT, M. Using ethnic art to emphasize laws of reflection. **The Physics Teacher**, v. 47, n. 8, p. 542-543, 2009.

- BARTLETT, A. *More physics for architects*. **Physics Today**, v. 34, n. 10, p. 9-86, 1981.
- BARTLETT, A. *Pinhole mirror*. **The Physics Teacher**, v. 34, n. 8, p. 479, 1996.
- BASS, M.; STRYLAND, E.; WILLIAMS, D.; WOLFE, W. *Handbook of Optics - volume I: fundamentals, techniques, and design*, 2^a ed., p. 1-26, New York: McGraw-Hill, 1995.
- BERRY, M. V. *Oriental magic mirrors and the Laplacian image*. **European Journal of Physics**, v. 27, n. 1, p. 109-118, 2005.
- BERRY, M.; KLEIN, S. *Transparent mirrors: rays, waves and localization*. **European Journal of Physics**, v. 18, n. 3, p. 222-228, 1997.
- BONGIOVANNI, C.; DOMINGUEZ, A.; CHEVAILLIER, J. *Understanding images of bubbles*. **European Journal of Physics**, v. 21, n. 6, p. 561-570, 2000.
- BONJORNO, J.; BONJORNO, R.; BONJORNO, V.; RAMOS, C.; ALVES, L. *Física: Terminologia, Óptica e Ondulatória volume 2*. 1^a ed., p. 222-226, São Paulo: FTD, 2010.
- BOULOMYTIS, V.; GARCIA, C.; SILVA, F.; TRABAQUINI, K.; CORRÊA, S. *Proposta metodológica para o estudo da refletância e da transmitância de uma superfície lambertiana no âmbito do sensoriamento remoto*. **Latin-American Journal of Physics Education**, v. 5, n. 2, p. 461-466, 2011.
- BOYER, H.; MIRANVILLE, F.; PAYET, F. *Low energy architecture in the tropics: from design to building construction*. 2012. Disponível em <arXiv:1212.5769>. Acesso: 14/12/2015.
- BRAGA, G. *Relações bibliométricas entre a frente de pesquisa (research front) e revisões da literatura: estudo aplicado à Ciência da informação*. **Ciência da Informação**, v. 2, n. 1, p. 9-26, 1973.
- BRASIL. *Lei nº 9.394, de 20 de dezembro de 1996*. Disponível em <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Leis/L9394.htm>. Acesso: 24/04/2017.
- BRASIL. *Parâmetros Curriculares Nacionais (Ensino Médio), Parte I - Bases Legais*. 109p, Brasília: Ministério da Educação, 2000a.
- BRASIL. *Parâmetros Curriculares Nacionais (Ensino Médio), Parte III - Ciências da Natureza, Matemática e suas Tecnologias*. 58p, Brasília: Ministério da Educação, 2000b.
- BROWN, R.; BUFFA, A.; HAFEMEISTER, D. *Physics for architects*. **Physics Today**, v. 35, n. 6, p. 84, 1982.

- CAMARGO, E.; NARDI, R.; MACIEL FILHO, P.; ALMEIDA, D. *Como ensinar Óptica para alunos cegos e com baixa visão*. **Física na Escola**, v.9, n.1, p. 20-25, 2008.
- CAMPOS, O. *O Palácio dos Arcos*. **Arquitetura – Revista do Instituto de Arquitetos do Brasil**, n. 76, p. 19-23, 1968.
- CAREGNATO, R.; MUTTI, R. *Pesquisa qualitativa: análise de discurso versus análise de conteúdo*. **Texto & Contexto – Enfermagem**, v. 15, n. 4, p. 679-84, 2006.
- CARLSON, J. *The signaling mirror: a life-saving application of reflection and refraction*. **The Physics Teacher**, v. 52, n. 6, p. 374-375, 2014.
- CASTAÑO, D.; HAWKINS, L. *Conicoid mirrors*. **European Journal of Physics**, v. 32, n. 2, p. 399-405, 2011.
- CATELLI, F. LAZZARI, F. *Interferência da Luz: uma versão simplificada do espelho de Lloyd*. **Física na Escola**, v. 5, n. 2, p. 20-22, 2004.
- CATELLI, F.; REIS, C. *Demonstre em aula: imagens dentro de lâmpadas*. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 21, n. 1, p. 115-119, 2004.
- CATELLI, F.; VICENZI, S. *Óptica Geométrica no café da manhã*. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 21, n. 3, p. 392-400, 2004.
- CAUSSAT, M.; RABAL, H.; MURAMATSU, M. *The levitating Buddha: constructing a realistic cylindrical mirror pseudo image*. **The Physics Teacher**, v. 44, n. 7, p. 443-444, 2006.
- CAVALCANTE, M.; RODRIGUES, E. *Uso do “espelho de Lloyd” como método de ensino de Óptica no Ensino Médio*. **Revista Brasileira de Ensino de Física** v. 34, n. 4, p. 4310.1-4310.4, 2012.
- CEPIC, M. *Does a virtual image cast a shadow?* **Physics Education**, v. 41, n. 4, p. 295-297, 2006.
- CHAKA, C. *Collaborative learning: leveraging concept mapping and cognitive flexibility theory*. In: MARRIOTT, R.; TORRES, P. *Handbook of research on collaborative learning using concept mapping*. 1^a ed., p. 152-170, Information Science Reference: Hershey, 2010.
- CHANDLER, D. *Understanding parabolic reflectors through paper folding*. **The Physics Teacher**, v. 39, n. 1, p. 24-25, 2001.
- CHIRINO, S.; RODRÍGUEZ, N.; RODRÍGUEZ, G. *Aprendizaje de contenidos de Óptica Geométrica utilizando software didáctico*. **Revista de Enseñanza de la Física**, v. 27, n. 2, p. 37-44, 2015.

- COLICCHIA, G.; WALTNER, C.; HOPF, M.; WIESNER, H. *The scallop's eye - a concave mirror in the context of biology*. **Physics Education**, v. 44, n. 2, p. 75-179, 2009.
- COSTA, L. *Plano Piloto de Brasília*. **Acrópole**, v. 22, n. 256, p. 48-59, 1960.
- COULLET, P.; FILIPPI, J. *Des corps flottants aux miroirs déformants-Une cité de la géométrie à l'Université de Nice Sophia Antipolis*. **Reflets de la Physique**, n. 32, p. 34-37, 2013.
- DA ROS, C. *A contribuição das visitas de campo no ensino das Ciências Agrárias na UFRRJ*. **Revista Ciência em Extensão**, v. 8, n. 1, p. 107-122, 2012.
- DAFFRON, J.; GREENSLADE JR, T. *Modern kaleidophones*. **The Physics Teacher**, v. 53, n. 7, p. 407-408, 2015.
- DE JESUS, V.; SASAKI, D. *Utilização do conceito de aumento angular para interpretar imagens observadas em espelhos esféricos côncavos*. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 35, n. 1, p. 1506.1-1506.7, 2013.
- DE LIMA, J.; COELHO, M.; VIEIRA, S. *Uma transformação linear para a produção de imagens anamórficas cilíndricas*. **Caderno de Física da UEFS**, v. 15, n. 1, p. 1602.1/15, 2017.
- DEWEERD, A.; HILL, S. *Optics over a cup of tea: images in concave and convex surfaces*. **Physics Education**, v. 40, n. 1, p. 13-14, 2005.
- DEWEERD, A.; HILL, S. *Reflection with a twist: the helical mirror*. **The Physics Teacher**, v. 44, n. 8, p. 496-497, 2006.
- DEWEERD, A.; HILL, S. *Reflections on handedness*. **The Physics Teacher**, v. 42, n. 5, p. 275-279, 2004.
- DIB, J. *Problemas de física aplicada à Arquitetura*. 1ª ed., 95p, [s.l.: s.n.], 1972.
- DONOSO, J.; CARAM, R.; RAMOS, A. *Ensino de física para um curso de Arquitetura*. **Atas do SNEF**, v. 16, 2005. Disponível em <http://www.cienciamao.usp.br/dados/snef/_ensinodefisicaparaumcurs.trabalho.pdf>. Acesso: 14/12/2005.
- DRUDE, P. *The theory of optics*, 1ª ed., p. 3, New York: Dover, 1959.
- ELLENSTEIN, M. *Magic sunglasses*. **The Physics Teacher**, v. 55, n. 3, p. 187, 2017.
- ERB, R. *Curved mirrors*. **Physics Education**, v. 30, n. 5, p. 287-288, 1995.
- ESCOBAR, I.; SAAVEDRA, G.; PONS, A.; MARTÍNEZ-CORRAL, M. *Simple demonstration of the impact of spherical aberration on optical imaging*. **European Journal of Physics**, v. 29, n. 3, p. 619-627, 2008.

- ESCOREL, S. “*O Palácio Itamaraty em Brasília*” [2002], in SAFRA INSTITUTO CULTURAL. *Palácio Itamaraty: Brasília, Rio de Janeiro*. 2ª ed., p. 11-25, São Paulo: Banco Safra, 2002.
- EVANS, H. *Ray tracing with hinged mirrors*. **The Physics Teacher**, v. 34, n. 5, p. 314-315, 1996.
- EVEN, C.; BALLAND, C.; GUILLET, V. *Learning through experimenting: an original way of teaching geometrical optics*. **European Journal of Physics**, v. 37, n. 6, p. 065707, 2016.
- FADEEV, P. *Two mirrors: infinite images of DiCaprio*. **The Physics Teacher**, v. 53, n. 8, p. 473-474, 2015.
- FAKHRUDDIN, H. *Specular reflection from a rough surface*. **The Physics Teacher**, v. 41, n. 4, p. 206-207, 2003.
- FEATONBY, D. *Backwards clock in a plane mirror - the answer*. **Physics Education**, v. 51, n. 4, p. 047001, 2016.
- FEATONBY, D. *How to make the 'real image' more real*. **Physics Education**, v. 42, n. 3, p. 126, 2007.
- FERRARO, N.; TOLEDO, P. *Aulas de física: Termologia, Óptica e Ondas – volume 2*. 7ª ed., p. 186-231, São Paulo: Atual, 2003.
- FERRARO, P. *What a caustic!* **The Physics Teacher**, v. 34, n. 9, p. 572-573, 1996.
- FIGUEIREDO, F. *A aprendizagem colaborativa: foco no processo de correção dialogada*. In: LEFFA, V. (org.), *A interação na aprendizagem das línguas*. 1ª ed., p. 125-157, Pelotas: EDUCAT, 2003.
- FLICK, U. *Introdução à pesquisa qualitativa*. 3ª ed., p. 219-275, Porto Alegre: Artmed, 2009.
- FREYRE, G. *Brasília – prós e contras* [1960], in XAVIER, A.; KATINSKY, J. (org.) *Brasília: antologia crítica*. 1ª ed., p. 49-53, São Paulo: Cosac Naify, 2012.
- FUKE, L.; YAMAMOTO, K. *Física para o Ensino Médio volume 2 – Termologia, Óptica e Ondulatória*. 1ª ed., p. 154-186, São Paulo: Saraiva, 2010.
- GADOTTI, M. *A questão da educação formal/não-formal*. **Sion: Institut International des Droits de 1º Enfant**, p. 1-11, 2005.
- GARDNER, M. *Mirror levitations*. **The Physics Teacher**, v. 37, n. 8, p. 468, 1999.

GASPAR, A. MONTEIRO, I. *Atividades experimentais de demonstrações em sala de aula: uma análise segundo o referencial da teoria de Vygotsky*. **Investigações em Ensino de Ciências**, v. 10, n. 2, p. 227-254, 2016.

GEHL, J. *Cidades para pessoas*. 2ª ed., 261p, São Paulo: Perspectiva, 2013.

GIBBS, U. *Análise de dados qualitativos*. 1ª ed., 198p, Porto Alegre: Artmed, 2009.

GIORDAN, M. *O papel da experimentação no Ensino de Ciências*. **Química Nova na Escola**, v. 10, n. 10, p. 43-49, 1999.

GLUCK, P. *Compact disc optics*. **The Physics Teacher**, v. 40, n. 8, p. 468-469, 2002.

GNECCO, G. *Brasília, ontem e hoje* [1995], in XAVIER, A.; KATINSKY, J. (org.) *Brasília: antologia crítica*. 1ª ed., p. 294-298, São Paulo: Cosac Naify, 2012.

GORELIK, A. *Brasília – museu da modernidade* [2007], in XAVIER, A.; KATINSKY, J. (org.) *Brasília: antologia crítica*. 1ª ed., p. 411-419, São Paulo: Cosac Naify, 2012.

GOUGH, W. *Stereoscopic effects with a long-playing record*. **European Journal of Physics**, v. 27, n. 2, p. 461-465, 2006.

GRAHAM, R. *Real image produced by a concave mirror*. **The Physics Teacher** v. 44, n.1, p. 186, 2006.

GRAUMANN, H.; LAUE, H. *Concave liquid-mirror experiments*. **The Physics Teacher**, v. 36, n.1, p. 28-31, 1998.

GREDLER, M. *Understanding Vygotsky for the classroom: is it too late?* **Educational Psychology Review**, v. 24, n. 1, p. 113-131, 2012.

GREENSLADE JR, T. *A quick experiment on reflection from concave mirrors*. **The Physics Teacher**, v. 38, n. 4, p. 206, 2000.

GREENSLADE JR, T. *Kaleidoscopes made with big mirrors*. **The Physics Teacher**, v. 47, n. 6, p. 334-335, 2009.

GREENSLADE JR, T. *Virtual mirrors*. **The Physics Teacher**, v. 48, n. 1, p. 26-27, 2010.

GROSSMAN, J. *Vampire selfie: a curious case of an absent reflection*. **The Physics Teacher**, v. 52, n. 8, p. 458-459, 2014.

GUERRA, H. *Edifício comercial em Londres reflete luz solar quente, o suficiente para fritar um ovo*. **Vitruvius**, v. 14, n. 072.01, 2013.

GUIMARÃES, L.; FONTE BOA, M. *Física: Termologia, Óptica e Ondas*. 1ª ed, p. 197-232, Niterói: Galera Hiperídia, 2005.

GUIMARÃES, O.; PIQUEIRA, J.; CARRON, W. *Física 2*, 1ª ed., p.210-240, São Paulo: Ática, 2013.

- HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. *Fundamentals of physics*, 9^a ed. (extended), p. 904, New York: John Wiley & Sons, 2011.
- HARE, J. *Solar heaters and other parabolic devices*. **Physics Education**, v. 42, n. 3, p.267-270, 2007.
- HEIMERL, F.; LOHMANN, S.; LANGE, S.; ERTL, T. *Word cloud explorer: text analytics based on word clouds*. **47th Hawaii International Conference on System Sciences**, p. 1833-1842, 2014. Disponível em < <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=6758829> > . Acesso: 19/01/2019.
- HETCH, E. *Optics*, 4^a ed., p.95-281, Pearson: Glenview, 2002.
- HEWITT, P. *Física conceitual*. 9. ed., p. 440-542, Porto Alegre: Bookman, 2002.
- HODSON, D. *Hacia un enfoque más crítico del trabajo de laboratório*. **Enseñanza de las ciencias**, v. 12, n. 3, p. 299-313, 1994.
- HODSON, D. *Laboratory work as scientific method: three decades of confusion and distortion*. **Journal of Curriculum Studies**, v. 28, n. 2, p. 115-135, 1996.
- HODSON, D. *Philosophy of science, science and science education*. **Studies in Science Education**, v. 12, n. 1, p. 25-57, 1985.
- HODSON, D. *Re-thinking old ways: towards a more critical approach to practical work in school science*. **Studies in Science Education**, v. 22, n. 1, p. 85-142, 1993.
- IVIC, I. *Lev Semionovich Vigotski*. 1^a ed., 140p, Recife: Fundação Joaquim Nabuco / Editora Massangana, 2010.
- KAEWKHONG, K.; CHITAREE, R. *A low-cost demonstration kit for locating an image formed by a plane mirror integrated with a ray diagram*. **Physics Education**, v. 50, n. 5, p. 522-528, 2015.
- KANTOR, C.; PAOLIELLO JR, L.; MENEZES, L.; BONETTI, M.; CANATO JR, O.; ALVES, V. *Coleção Quanta Física – 2º ano – Ensino Médio*. 1^a ed., p.88-112, São Paulo: Editora PD, 2010.
- KEEPORTS, D. *Reflections from a Fresnel lens*. **Physics Education**, v. 40, n. 1, p. 60-66, 2005.
- KLEM JR, D. *Glass: a deadly conservation issue for birds*. **Bird Observer**, v. 34, n. 2, p. 73-81, 2006.
- KOHLSDORF, M. *A apreensão da forma da cidade*. 1^a ed., 253p, Brasília: Editora Universidade de Brasília, 1996.

- KORSUNSKY, B. *The star and the imagemaker (M3)*. **The Physics Teacher**, v. 43, n. 5, p. 312, 2005.
- KÜÇÜKÖZER, A. *Differentiating real and virtual images*. **Physics Education**, v. 46, n. 6, p. 656-658, 2011.
- LARA, F. *A insustentável leveza da modernidade*, **Arquitextos**, v.5, n.05.057, 2005.
- LAURICELLA, A.; BRITO FILHO, B.; SEVEGNANI, F.; FRUGOLI, P.; PEREIRA FILHO, R. *Física aplicada à Arquitetura*. 1ª ed., 293p, São Paulo: [s.n.], 1992.
- LEE JR, R.; HERNÁNDEZ-ANDRÉS, J. *Virtual tunnels and green glass: the colors of common mirrors*. **American Journal of Physics**, v. 72, n. 1, p. 53-59, 2004.
- LEMOS, C. *O que é Arquitetura*. 1ª ed., p. 75, São Paulo: Brasiliense, 1980.
- LIBERTUN, A. *Warning! Objects in mirror are closer than they appear*. **The Physics Teacher**, v. 41, n. 1, p. 20-21, 2003.
- MAIZTEGUI, A.; CHAMORRO, G.; TISERA, J. *Un procedimiento experimental para ubicar imágenes*. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 15, n. 2, p. 136-163, 1998.
- MANIOĞLU, G.; YILMAZ, Z. *Energy efficient design strategies in the hot dry area of Turkey*. **Building and Environment**, v. 43, n. 7, p. 1301-1309, 2008.
- MANSELL, P. *Where is the reflection?* **The Physics Teacher**, v. 45, n.2, p.119, 2007.
- MARINI, M.; CAMARGO, C. *Estudo sobre colisões de aves com os prédios da sede da Procuradoria Geral da República, Brasília, DF*. Não publicado, 26 p, 2005.
- MARTINS, R.; SILVA, A. *Princípios da Óptica Geométrica e suas exceções: Heron e a reflexão em espelhos*. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 35, n. 1, p. 1605.1-1605.9, 2013.
- MÁXIMO, A.; ALVARENGA, B. *Curso de Física, volume 2*. 6ª ed., p. 153-265, Scipione, São Paulo, 2005.
- MAYER, V.; VARAKSINA, E. *Acoustic models of optical mirrors*. **Physics Education**, v. 49, n. 5, p. 548, 2014.
- McBRIDE, D. *Transfer of learning from traditional optics to wavefront aberrometry*. Tese de Doutorado, 139p, Departamento de Física, Kansas State University, 2009.
- MILLS, A. *Magic mirrors*. **Physics Education**, v. 46, n. 5, p. 595-598, 2011.
- MOHAMMADPOUR, H. *Look around to learn Physics*. **The Physics Teacher**, v. 46, n.3, p. 158-159, 2008.
- MOLESINI, G.; VANNONI, M. *Light reflection from water surfaces perturbed by falling rain droplets*. **European Journal of Physics**, v. 30, n. 5, p. 1009-1014, 2009.

- MOLESINI, G.; VANNONI, M. *Light reflection in a pool under falling rain droplets*. **European Journal of Physics**, v. 29, n. 3, p. 403, 2008.
- MOORE, J.; FLOYD, R. THOMPSON, C. *Using billiard balls to explore the concept of virtual images*. **Physics Education**, v. 46, n. 4, p. 382-384, 2011.
- MOREIRA, M. *Pesquisa em ensino: métodos qualitativos*. [2011]. In: MOREIRA, M. *Metodologias de pesquisa em ensino*. 1ª ed., p.73-113, São Paulo: Editora Livraria da Física, 2011.
- NEWTON, I. *Opticks: or, a treatise of the reflections, refractions, inflections and colours of light*, 4ª ed., 224p, London: William Innys, 1730. Disponível em <<https://archive.org/details/opticksortreatis1730newt>>. Acesso: 30/01/2019.
- NIEMEYER, O. *A forma na Arquitetura*. 1ª ed., 55p, Rio de Janeiro: Avenir, 1978.
- NIEMEYER, O. *Depoimento*. **Módulo**, n. 9, p. 3-6, 1958.
- NIEMEYER, O. *Minha Arquitetura*. 3ª ed., p.9-92, Rio de Janeiro: Revan, 2000.
- NIEMEYER, O. *Setor Bancário de Brasília*. **Módulo**, [s.v], n.13, p.8. 1959.
- NUSSENZVEIG, H. *Curso de Física básica 4 – Ótica, Relatividade, Física quântica*, 1ª ed., p. 6-23, São Paulo: Blucher, 1998.
- OKTAY, D. *Design with the climate in housing environments: an analysis in Northern Cyprus*. **Building and Environment**, v. 37, n. 10, p. 1003-1012, 2002.
- OLIVEIRA, J. K. *De Pampulha a Brasília – os caminhos da providência*. **Módulo**, n. 41, p. 14-19, 1976.
- OLIVEIRA, J. K. *Por que construí Brasília*. 1ª ed., [s.p.]. Rio de Janeiro, Bloch, 1975.
- OLIVEIRA, J.; ANJOS, F.; LEITE, F. *O potencial da paisagem urbana como atratividade turística: um estudo sobre a paisagem de Brasília-DF*. **Interações**, v. 9, n. 2, p. 159-169, 2008.
- OLIVEIRA, M. *As visitas de estudo e o ensino e a aprendizagem das Ciências Físico-químicas: um estudo sobre concepções e práticas de professores e alunos*. Dissertação de Mestrado, 262p, Faculdade de Educação, Universidade do Minho, 2008.
- OMELCZUCK, A.; SOGA, D.; MURAMATSU, M. *200 anos de caleidoscópio*. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 39, n. 3, e3602, 2017.
- PALEIOV, O.; PUPKO, O.; LIPSON, S. *Demonstrating Fermat's principle in Optics*. **Physics Education**, v. 46, n. 6, p. 702-704, 2011.
- PEI, I.; BOEHM, G. *Conversations with I.M. Pei: light is the key*, 1ª ed., 125p, New York: Prestel, 2000.

PENA, F.; LEITÃO, V. *Quando é que um espelho esférico pode funcionar tão bem como um espelho parabólico?* **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 29, n. 1, p. 180-182, 2012.

PESAVENTO, S. *Cidade, espaço e tempo: reflexões sobre a memória e o patrimônio urbano.* **Cadernos do LEPAARQ**, v. 2, n. 4, p. 9-17, 2005.

PIETROCOLA, M.; POGIBIN, A.; ANDRADE, R.; ROMERO, T. *Física em contextos: pessoal, social e histórico: energia, calor, imagem e som: volume 2.* 1ª ed., p. 322-366, São Paulo: FTD, 2011.

PRESTES, Z. *Quando não é quase a mesma coisa. Análise de traduções de Lev Vigotsky*, 2012. Tese de doutorado, Faculdade de Educação, UnB, 295p, 2012.

PROVIDÊNCIA, C. *Mão direita e mão esquerda: qual é a diferença?* **Gazeta de Física**, v. 32, n. 1, p. 42-44, 2009.

PROVIDÊNCIA, C.; PROVIDÊNCIA, P. *Que simetrias encontramos?* **Gazeta de Física**, v. 37, n. 3, p. 40-42, 2014.

PRYTZ, KI. *The atomic origin of the reflection law.* **The Physics Teacher**, v. 54, n. 9, p. 535-537, 2016.

RAMALHO, F.; FERRARO, N.; TOLEDO, P. *Os fundamentos da Física 2.* 9ª ed., p. 238-283, São Paulo: Moderna, 2007.

RIBEIRO, J. *A glass of wine a day does not keep optics away! Reflection and refraction images in wine glasses.* **The Physics Teacher**, v. 51, n.8, p.506-507, 2013.

RIBEIRO, J. *A imagem-ciclope em uma associação de dois espelhos planos: demonstração algébrica das condições de ocorrência.* **Caderno de Física da UEFS**, v. 14, n. 1, p.1402.1-9, 2016a.

RIBEIRO, J. *A plane mirror experiment inspired by a comic strip.* **Physics Education**, v. 51, n. 1, p. 015011, 2015a.

RIBEIRO, J. *A projeção de sombras refletidas no espetáculo de dança Gravité: relato de uma atividade didática.* **Física na Escola**, v. 14, n. 2, p.36-41, 2016b.

RIBEIRO, J. *Are you ready, kids? It's SpongeBob triclops!* **The Physics Teacher**, v. 53, n. 5, p. 298-299, 2015b.

RIBEIRO, J. *Arquitetura óptica: análise de um modelo de associação de espelhos cilíndricos como representação dos prédios da Procuradoria Geral da República.* **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 32, n. 3, p. 837-855, 2015c.

- RIBEIRO, J. *Construção geométrica e demonstração experimental da formação da “imagem ciclópica” em uma associação de dois espelhos planos*. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 36, n. 4, p. 4401.1-4401.7, 2014.
- RIBEIRO, J. *Experimentos em Óptica: uma proposta de reconceitualização*. Dissertação de Mestrado em Ensino de Ciências, 160p, Programa de Pós-Graduação de Ensino de Ciências, Universidade de Brasília, Brasília, 2010.
- RIBEIRO, J. *Reflections on a disco ball*. **The Physics Teacher**, v. 54, n. 9, p. 532-534, 2016c.
- RIBEIRO, J. *Relato de uma atividade investigativa sobre reflexão em espelhos planos no Ensino Médio uma proposta de intervenção na realidade*. **Revista do Professor de Física**, vol. 1, n. 1, p. 1-11, 2017.
- RIBEIRO, J. *Symmetry breaking: a compact disc reflected in a mirror*. **Physics Education**, v. 51, n. 6, p. 063006, 2016d.
- RIBEIRO, J. *Traçado da cáustica a partir de imagens do Google Maps: uma atividade em Óptica Geométrica para o Ensino Médio*. **Física na Escola**, v. 14, n. 1, p. 17-21, 2016e.
- RIBEIRO, J.; CARNEIRO, M. *A reflexão da luz nos periódicos de ensino de física: evidenciando tendências e carências de pesquisa a partir de uma revisão bibliográfica*. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 33, n. 2, p. 355 - 398, 2016a.
- RIBEIRO, J.; CARNEIRO, M. *O conceito de reflexão luminosa: categorização e análise de atributos de conceito a partir das definições de livros didáticos de Física de Ensino Médio*. **Anais do Encontro de Pesquisa em Educação da Região Centro Oeste – Reunião Científica Regional da ANPEd XIII**. Brasília: Universidade de Brasília, ANPEd, 2016.
- RIBEIRO, J.; VERDEAUX, M. *Atividades experimentais no ensino de Óptica: uma revisão*. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 34, n.4, p. 4403.1-4403.9, 2012a.
- RIVEROS, H.; ROSENBERGER, F. *Images in the air*. **Physics Education**, v. 47, n.3, p. 342-345, 2012.
- ROBINETT, R.; MULFINGER, C.; PASSANEAU, J. *Optical realization of a circular billiard*. **The Physics Teacher**, v. 36, n. 9, p. 547-552, 1998.
- RODE, H.; FRIEGE, G. *Nine optical black-box experiments for lower-secondary students*. **Physics Education**, v. 52, n. 3, p. 035009, 2017.

RODRIGUES, M.; MACKEDANZ, L. *Produção de espelhos parabólicos e construção do conceito de função polinomial de 2º grau*. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 40, n. 1, e1502, 2017.

RODRÍGUEZ, C.; ALBERÚ, M. *La experimentación para detonar el interés en la física*. **Latin-American Journal of Physics Education**, v. 11, n. 2, p. 2311-1/8, 2017.

ROEDER, J. *The effect of reflectors on light intensity* **The Physics Teacher** v. 50, n.4, p. 246, 2012.

ROJAS, R. *Graphical synthesis of sign conventions in geometrical optics*. **European Journal of Physics**, v. 34, n. 4, p. 1089-1093, 2013.

ROSSETTI, E. *Arquiteturas de Brasília*. 1ª ed., 180p, Brasília: Instituto Terceiro Setor, 2012.

ROVŠEK, B. *Making a cat's eye in a classroom*. **Physics Education**, v. 45, n. 2, p. 186-189, 2010.

RUSSELL, D. *Alfresco reflections*. **The Physics Teacher**, v.48, n. 1, p.74, 2010.

SALAMO, G.; BREWER, J.; BERRY, J. *Physics for architects*, **American Journal of Physics**, v. 47, n. 1, p. 24-28, 1979.

SALINAS, J.; SANDOVAL, J. *Enseñanza Experimental de la Óptica Geométrica: Campos de Visión de Lentes y Espejos*. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 22, n. 2, p. 259-265, 2000.

SALU, Y. *Physics for architects*, 2ª ed., 354p, Conshohocken: Infinity Publishing, 2013.

SANTANA, A.; RODRIGUEZ, Y.; GOMEZ, E. *Construction of ray diagrams in geometrical optics: a media-focused approach*. **Physics Education**, v. 47, n. 6, p. 715-720, 2012.

SANTOS, M. *A natureza do espaço: técnica e tempo, razão e emoção*. 4ª ed., p. 57-71, São Paulo, Editora USP, 2006.

SANTOS, M. *Técnica, espaço, tempo: globalização e meio técnico-científico informacional*. 1ª ed., [s.p], São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2008.

ŞENGÖREN, S.; ÇOBAN, G. *Some remarks on using the principal rays for teaching the elementary optics*. **Latin-American Journal of Physics Education**, v. 5, n. 1, p. 123-125, 2011.

SERWAY, R.; VUILLE, C. *College physics*, 9a ed., p. 762, Boston: Cengage Learning, 2011.

- SERWEY, R.; JEWETT, J. *Physics for scientists and engineers*, 6^a ed., p.1109, Belmont: Brooks Cole, 2003.
- SHARMA, N. *Reflection, refraction, and multislit interference*. **European Journal of Physics**, v. 25, n. 1, p. 1-6, 2003.
- SILVA, C.; BARRETO, B. *Física aula por aula vol.2*, 1^a ed., p. 285-296, São Paulo: FTD, 2008.
- SILVA, E. *Matéria, ideia e forma: uma definição de Arquitetura*, 1^a ed., p.91-100, Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS, 1994.
- SILVA, M. *Sistemas óticos com dois espelhos*. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 34, n. 3, p. 3307.1-3307.8, 2012.
- SILVA, O.; LABURÚ, C. *Uma alternativa de baixo custo ao experimento de Óptica denominado comercialmente “Magic Hologram–Mirage 3D”*. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 32, n. 1, p. 246-252, 2015.
- SILVA, R.; MACHADO, P.; TUNES, E. *Experimentar sem medo de errar*. In: SANTOS, W.; MALDANER, O. (org.) **Ensino de Química em foco**. 1^a ed., p.231-261, Ijuí: UNIJUÍ, 2010.
- SILVA, T. *Banco óptico de baixo custo*. **Física na Escola**, v.5, n.1, p.15, 2004.
- SILVEIRA, F.; AXT, R. *O eclipse solar e as imagens produzidas no chão ou numa parede*. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 24, n. 3, p. 353-359, 2007.
- SILVEIRA, F.; AXT, R. *O que vemos quando projetamos a luz do Sol com um espelho plano: manchas luminosas ou imagens?* **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 24, n. 3, p. 353-359, 2001.
- SILVEIRA, F.; AXT, R.; PIRES, M. *O que vemos quando nos miramos em um espelho côncavo?* **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 26, n. 1, p. 19-25, 2004.
- SIQUEIRA, L.; ALCÂNTARA, P. *Modificando a atuação docente utilizando a colaboração*. **Revista Diálogo Educacional**, v. 4, n. 8, p. 57-69, 2003.
- SÖZEN, M.; GEDÍK, G. *Evaluation of traditional architecture in terms of building physics: old Diyarbakir houses*. **Building and Environment**, v. 42, n. 4, p. 1810-1816, 2007.
- TANTILLO, M. *Paraffin Puzzler*. **The Physics Teacher**, v. 46, n. 6, p. 380, 2008.
- TAO, P; LEE, H. *Classroom investigation of the Chinese “magic” mirror*. **The Physics Teacher**, v. 35, n. 9, p. 536-538, 1997.
- TAVARES, J. *50 anos do concurso para Brasília – um breve histórico*. **Arquitextos**, v. 8, n. 086.07, 2007.

- THOMPSON, G.; MATHIESON, D. *The mirror box*. **The Physics Teacher**, v. 39, n. 8, p. 508-509, 2001.
- TIPLER, P.; MOSCA, G. *Physics for scientists and engineers – with modern physics*, 1ª ed., p. 1061, New York: W. H. Freeman and Company, 2008.
- TOEPKER, T. *Purkinje images*. **The Physics Teacher** v. 52, n.3, p. 133, 2014.
- TONUCCI, F. *La Ciudad de los Niños: un modo nuevo de pensar la ciudad* [1997]. In: MÜLLER, F. *Infância e cidade: Porto Alegre através das lentes das crianças*. **Educação e Realidade**, v. 37, n. 1, p. 295-318, 2012.
- TRUMPER, R. *The Physics laboratory – a historical overview and future perspectives*. **Science & Education**, v. 12, n. 7, p. 645-670, 2003.
- UENO, P. *Física volume único: série Novo Ensino Médio*, p. 201-253, São Paulo: Ática, 2005.
- UYSAL, A. *Determining the thickness and refractive index of a mirror*. **The Physics Teacher**, v. 48, n. 9, p. 602-603, 2010.
- VAN BEVEREN, E.; KLEEFELD, F.; RUPP, G. *Images in Christmas baubles*. **European Journal of Physics**, v. 27, p. 337-346, 2006.
- VIEIRA, L. *Measuring the dependence of reflectivity on the incidence angle: a technical note*. **European Journal of Physics**, v. 35, n. 5, p. 55013-55019, 2014.
- VIGOTSKI, L. *A construção do pensamento e da linguagem*. [s.p], São Paulo: Martins Fontes, 2001.
- VIGOTSKI, L. *A formação social da mente*. 7ª ed., 182p, São Paulo: Martins Fontes, 2007.
- VOLLMER, M.; MÖLLMANN, K. *Caustic effects due to sunlight reflections from skyscrapers: simulations and experiments*. **European Journal of Physics**, v.33, n. 5, p. 1429-1455, 2012.
- WATANABE, G.; HOSOKAWA, G. *Contos de espelho: um diálogo possível entre o ensino de física e de literatura*. **Física na Escola**, v. 14, n. 1, p. 4-7, 2016.
- XAVIER, A.; KATINSKY, J. *Brasília: antologia crítica*. 1ª ed., São Paulo: Cosac Naify, 2012.
- XAVIER, C.; BARRETO, B. *Física aula por aula – volume 2*. 1ª ed., p. 266-296, São Paulo: FTD, 2008.
- YASUDA, K., KIM, A., CHO, H., TIMOFEJEV, T., WALECKI, W. J., KLEP, J.; EDELSON, A.; WALECKI, A.; WALECKI, E.; WALECKI, P. S. *Specular reflection from rough surfaces revisited*. **The Physics Teacher**, v. 54, n. 7, p. 394-396, 2016.

- YÁZIGI, E. *Turismo e Paisagem*. 1ª ed., p. 7, São Paulo: Contexto, 2002.
- YURUMEZOGLU, K. *Activity teaches mirror concepts*. **Physics Education**, v. 44, n. 5, p. 462-464, 2009.
- YURUMEZOGLU, K. *Touching the real image*. **Physics Education**, v. 51, n. 3, p. 033004, 2016.
- YURUMEZOGLU, K.; OGUZ-UNVER, A. *Experiments on the nature of how multiple images form in a plane mirror*. **Latin-American Journal of Physics Education**, v. 4, n. 3, p. 515-519, 2010.
- ZANARDI, D.; MURAMATSU, M. *Um pouco de Física na superfície do café*. **Física na Escola**, v. 12, n. 1, p. 27-29, 2011.
- ZARETSKII, V. *The zone of proximal development: what Vygotsky did not have time to write*. **Journal of Russian & East European Psychology**, v. 47, n. 6, p. 70-93, 2009.
- ZETIE, K. *What is an image?* **Physics Education**, v. 52, n. 1, p. 023003, 2017.

Apêndice A

Detalhes construtivos da maquete da Procuradoria Geral da República

1. Construção da maquete

As maquetes têm longa tradição na Arquitetura: segundo Dutton (1970), ainda no século XVI, Michelangelo construiu um modelo do domo da Basílica de São Pedro, no Vaticano, antes da sua edificação. O uso de maquetes como recurso de aprendizagem já tem tradição no campo do ensino de Geografia (*e.g.* LOMBARDO e CASTRO, 1996; SIMIELLI *et al.*, 1992) e, segundo Santos (2009), as maquetes são mais facilmente compreendidas pelos estudantes que os mapas, por facilitar o domínio visual do conjunto espacial e a percepção da tridimensionalidade, facilitando, portanto, a apreensão do espaço.

Para a construção da maquete da Procuradoria Geral da República (PGR), tomamos como orientação as sugestões de Dutton (1970), para quem um modelo de uma edificação deve ser construído levando-se em conta o seu propósito, o custo dos materiais, o tempo de montagem e o espaço de exposição. No caso aqui descrito, tais condições poderiam ser assim visualizadas; a intenção primária de uso da maquete era a aprendizagem de princípios da Óptica; o custo deveria ser baixo, pelas inerentes limitações financeiras da pesquisa; a montagem das maquetes pelos estudantes deveria ser conduzida rapidamente; e sua exposição se faria sobre uma bancada de laboratório, limitando as dimensões do modelo (a maquete construída para esse trabalho tinha dimensões no plano horizontal inferiores a 1,0 m). Essas condições permitiram a adoção de um baixo nível de detalhamento nos elementos da maquete.

A maquete se iniciou com a produção de um mapa do sítio arquitetônico. Tomamos como referência para essa etapa as imagens do aplicativo gratuito *Google Maps*, que exibe fotos aéreas de alta qualidade para a estrutura arquitetônica escolhida. Uma imagem da PGR foi capturada no aplicativo, e usamos então a ferramenta de edição de imagens gratuita *Inkscape* para ampliar a imagem obtida até o tamanho conveniente (figura 1).

Vale frisar que, como uma maquete é uma representação do espaço geográfico, ela está sujeita às regras de escalas cartográficas. Assim, uma referência para a medição de distâncias na maquete foi disponibilizada, no canto direito inferior do mapa impresso. Ressaltamos, todavia, que não nos propusemos a investigar o entendimento do conceito de escalas entre os estudantes.

Figura 1. Vista aérea do complexo arquitetônico da PGR.



Fonte: <<https://www.google.com/maps/@-15.8076296,-47.8594703,215m/data=!3m1!1e3>>. Acesso: 08/03/2016.

Após o mapa ter sido editado no *Inkscape*, o mesmo foi encaminhado para um *bureau* de impressão em grandes formatos. Em seguida, a imagem impressa foi colada sobre uma lâmina plana de isopor.

Partimos então para a representação dos edifícios cilíndricos da PGR. Para a nossa proposta de ensino, era importante que tivéssemos acesso às dimensões reais desses edifícios. É lamentável, portanto, não termos conseguido acessar as plantas originais dos edifícios, ainda que três instâncias tenham sido buscadas para tal: a assessoria de imprensa da própria Procuradoria Geral da República, a Fundação Oscar Niemeyer (responsável pelo legado do arquiteto que projetou a PGR) e a Terracap (órgão do Governo do Distrito Federal responsável pela gestão do seu território).

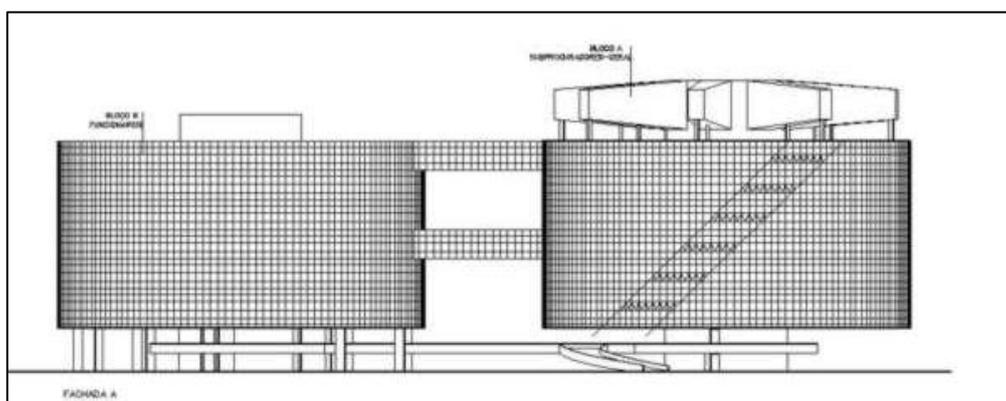
Assim, tivemos que obter tais dimensões a partir de imagens que encontramos *online*, em particular no *Google Maps*. As dimensões horizontais dos prédios (comprimento e largura) foram estimadas a partir da ferramenta de medida de distâncias, aplicada sobre a figura 1. Essa ferramenta depende do sistema operacional utilizado e passa por alterações contínuas para maior facilidade de uso por parte dos usuários.

Empregando esse procedimento de medidas de distâncias, estimamos o valor de 62 m como diâmetro para cada prédio cilíndrico, sendo a menor distância entre eles

igual a 22 m, ao longo das passarelas de interligação. Ressalvamos que, embora no *Google Maps* seja possível obter precisão da ordem de decímetros, preferimos desconsiderar as casas decimais, pois a construção da maquete em escala reduzida não permitiria tal grau de precisão.

A ferramenta, entretanto, não permitiu a medição direta da altura dos edifícios, a qual foi estimada a partir de estabelecimento de proporções matemáticas entre visões superiores e laterais das construções. Utilizamos então a figura 2, a qual mostra um diagrama arquitetônico das fachadas da PGR, como referência para estimarmos as alturas dos prédios.

Figura 2. Projeto da fachada dos prédios principais da PGR



Fonte: <http://www.pgr.mpf.mp.br/conheca-o-mpf/visitaçao-a-pgr/copy_of_sobre-o-predio/pgr_desenho_1.jpg> (editado). Acesso: 29/11/2014.

O diagrama da figura 2 permite estabelecer que cada cilindro espelhado apresenta altura igual ao seu raio (metade do diâmetro), o qual vale aproximadamente 31 m. Se as áreas não espelhadas (térreo e cobertura) forem levadas em conta, os valores aproximados das alturas dos edifícios seriam 44 m (à esquerda) e 49 m (à direita).

Encontrar objetos cotidianos capazes de representar os prédios da PGR em escala reduzida se revelou uma tarefa árdua. Após visitas a lojas de ferragens, materiais de construção e hipermercados, adquirimos duas lixeiras cromadas HSP-001A (Sertrading/BR) de aço inox, com 3 litros de capacidade cada, para a construção do modelo. Cada lixeira tinha diâmetro externo de 18 cm e altura de 30 cm. A altura ideal para tal diâmetro, entretanto, seria por volta de 13 cm. Assim, nossa maquete apresenta um elemento de distorção em relação ao sítio arquitetônico, fato que não consideramos

limitador para os fins da pesquisa, pois nossa preocupação principal era a comparação entre os fenômenos ópticos observados na maquete com aqueles visíveis nos prédios da PGR e, nesse quesito, a maquete final (figura 3) se revelou bastante adequada.

Figura 3. Maquete desenvolvida para a atividade experimental.



Fotografia do autor (2016).

2. Referências

DUTTON, M. *A students' guide to model making*. 1ª ed., p. 1-6 / 51-55, Rushcutters Bay: Pergamon Press Australia, 1970.

LOMBARDO, M.; CASTRO, J. *O uso de maquete como recurso didático*. **Anais do II Colóquio de Cartografia para Crianças**, Belo Horizonte, p. 81-83, 1996.

RIBEIRO, J. *Arquitetura óptica: análise de um modelo de associação de espelhos cilíndricos como representação dos prédios da Procuradoria Geral da República*. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 32, n. 3, p. 837-855, 2015c.

SIMIELLI, M.; GIRARDI, G.; BROMBERG, P.; MORONE, R.; RAIMUNDO, S. *Do plano ao tridimensional: a maquete como recurso didático*. **Boletim Paulista de Geografia**, v.70, p.5-21, 1992.

Apêndice B

Protocolos de investigação preliminares (Estudo-piloto)

Protocolo de investigação: *Atividade Experimental A*

Obrigado pela presença.

A atividade que nós faremos hoje é parte da pesquisa que estamos realizando sobre educação em ciências. De forma mais específica, estamos pesquisando maneiras de se aprender sobre reflexão da luz a partir de estruturas arquitetônicas, usando como exemplos alguns dos prédios que nós observamos na visita de campo. Essa é a primeira de três atividades que iremos fazer. Hoje, vamos trabalhar com um modelo experimental representando o Setor Bancário Sul.

A sua participação é totalmente voluntária, mas tanto vocês quanto seus pais precisam ter assinado o termo de consentimento livre e esclarecido. Se alguém desejar não participar da pesquisa, basta nos comunicar em qualquer momento, seja durante a atividade de hoje ou no futuro, que sua participação será removida. Quero frisar que ninguém será identificado na pesquisa: para cada participante, será atribuído um pseudônimo (nome falso).

Apenas o áudio da atividade está sendo gravado. Somente os pesquisadores terão acesso a essa gravação. Caso você deseje retirar alguma frase ou trecho, basta nos avisar após a gravação. A gravação será transcrita para um texto, para que possamos fazer a análise.

É importante que vocês saibam que não há respostas corretas ou erradas aqui. Não há notas, nenhum relatório a preencher, nem qualquer pontuação extra nas suas atividades escolares normais. Pedimos que vocês não tenham ressalvas em dizer o que estão pensando sobre um tema ou uma pergunta, para que as respostas sejam as mais ricas possíveis e permitam uma análise mais profunda. Perguntas também são bem-vindas, pois o professor também é um participante da pesquisa.

Em alguns momentos, nós vamos pedir para vocês fazerem algum desenho ou diagrama. Pedimos que vocês deixem os desenhos sobre a mesa. Se por qualquer razão você não quiser deixá-los, não há problema.

(1) Vamos começar a atividade. Todos se lembram dos prédios do Setor Bancário Sul? (caso a resposta seja negativa, mostrar alguma fotografia dos mesmos)

- (2) O que vocês lembram quando pensam naqueles prédios?
- (3) Todos os prédios se comportavam como espelhos? Até mesmo os prédios do Banco Central e da Caixa Econômica Federal? Como você nomearia esses dois prédios (buscar a resposta “objetos”; caso a mesma não apareça, explicar).
- (3) Vocês observaram algum fenômeno óptico nas fachadas dos prédios à frente do BCB e da CEF?
- (4) Qual o formato geométrico desses prédios?
- (5) As janelas de vários edifícios do lado oposto ao BCB e CEF são totalmente espelhadas. Tratando os prédios como espelhos, como você os classificaria?
- (10) Na visita de campo, você conseguiu observar imagens refletidas dos prédios da CEF e do BCB nesses prédios espelhados?
- (11) Essas imagens eram nítidas? Por que isso acontece?
- (12) Era possível observar essas imagens em qualquer posição?
- (13) Para conseguir observar essas imagens, o que você fez?
- (14) Era possível ver esses prédios inteiramente refletidos? Por que isso acontece?
- (15) Para você observar um prédio inteiramente refletido, é necessário que o prédio refletor seja maior que o objeto?
- (16) Para representar alguns dos prédios com fachadas refletoras, nós vamos usar três pequenos espelhos planos. Aqui, temos um maior (mostrar espelho plano para os estudantes). Gostaria que cada um de vocês se observasse nesse espelho. Como você descreve a imagem produzida em um espelho plano?
- (17) Coloque agora o espelho mais afastado de você. O tamanho da sua imagem é alterado? Por que a imagem parece menor?
- (18) Vamos usar agora a maquete que representa o Setor Bancário Sul. Reparem nos três espelhos planos. É possível observar a imagem do prédio do BCB em todos eles? Ao mesmo tempo? Como você se colocou para observar essas imagens?

(19) É possível observar a imagem do prédio da CEF em todos eles? Ao mesmo tempo? Como você se colocou para observar essas imagens?

(20) Você conseguiu observar a imagem completa do BCB ou da CEF em algum dos espelhos? Qual?

(21) Para observar a imagem completa, o prédio espelhado deveria ter uma altura maior, menor ou igual ao prédio que funciona como objeto? Por quê?

(22) Escolhendo um objeto (BCB ou CEF), as imagens que você observou em cada um dos espelhos têm o mesmo tamanho ou não? Esse tamanho depende da distância entre você e o espelho?

(23) Vamos distribuir agora um mapa do Setor Bancário Sul para vocês, semelhante ao usado na maquete. Gostaria que cada um de vocês marcasse no mapa algum ponto em que a pessoa deveria estar para ver o prédio do BCB refletido em cada um dos prédios. Marquem assim: *B1*, *B2* e *B3*. (explicar que *B1* significa ver o prédio do BCB refletido no prédio espelhado 1, *B2* no segundo prédio e *B3* no terceiro). Vocês podem usar a maquete como referência.

(24) No mesmo mapa, queremos que vocês marquem agora algum ponto em que a pessoa deveria estar para ver o prédio da CEF refletido em cada um dos prédios. Usem a legenda *C1*, *C2* e *C3*. Vocês podem usar a maquete como referência.

(25) Gostaria que cada um de vocês fizesse agora um esquema explicando a formação da imagem. O esquema deve conter um dos objetos (BCB ou CEF), um dos espelhos (1, 2 ou 3), a imagem do objeto e o observador (você).

(26) Em sua opinião, quais as vantagens de se trabalhar com esse modelo experimental ao invés da visita de campo?

(27) Quais as desvantagens?

(28) A maquete representa bem a realidade? O que você acha que poderia ser mudado?

(29) Por fim, vamos entregar para vocês um exercício didático tradicional de Óptica, desenvolvido a partir da situação estudada hoje. Você tem o tempo que necessitar para resolvê-lo. Essa última parte da atividade é opcional, e o exercício está mostrado a seguir:

A figura mostra o prédio do Banco Central do Brasil (BCB, com 100 metros de altura) em frente a outro edifício de fachada espelhada, o qual é considerado um espelho plano de 40 m de altura. A distância entre as fachadas dos dois prédios é 24 m. Um observador ao nível do solo, a uma distância X do prédio espelhado, observa uma imagem completa do Banco Central por reflexão na fachada refletora (fig. 53). Desprezando a altura do observador, qual a menor distância X para que isso seja possível?

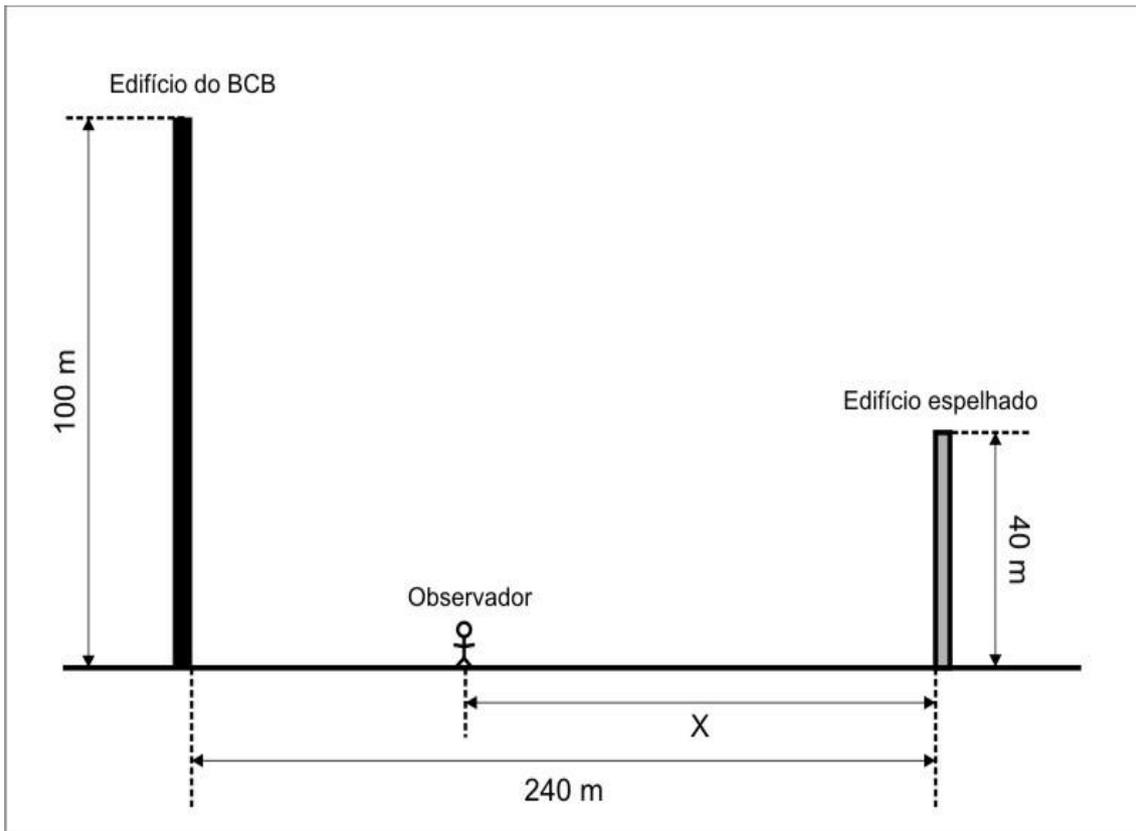


Fig.53 – Esquema geométrico para o questionamento (29) da Atividade Experimental A.

Protocolo de investigação: *Atividade Experimental B*

Obrigado pela presença.

Essa é a segunda atividade que nós faremos como parte da pesquisa que estamos realizando sobre educação em ciências. De forma mais específica, estamos pesquisando maneiras de se aprender sobre reflexão da luz a partir de estruturas arquitetônicas, usando como exemplos alguns dos prédios que nós observamos na visita de campo. Na atividade de hoje, vamos trabalhar com um modelo experimental representando o Palácio do Itamaraty.

A sua participação é totalmente voluntária, mas tanto vocês quanto seus pais precisam ter assinado o termo de consentimento livre e esclarecido. Se alguém desejar não participar da pesquisa, basta nos comunicar em qualquer momento, seja durante a atividade de hoje ou no futuro, que sua participação será removida. Quero frisar que ninguém será identificado na pesquisa: para cada participante, será atribuído um pseudônimo (nome falso).

Apenas o áudio da atividade está sendo gravado. Somente os pesquisadores terão acesso a essa gravação. Caso você deseje retirar alguma frase ou trecho, basta nos avisar após a gravação. A gravação será transcrita para um texto, para que possamos fazer a análise.

É importante que vocês saibam que não há respostas corretas ou erradas aqui. Não há notas, nenhum relatório a preencher, nem qualquer pontuação extra nas suas atividades escolares normais. Pedimos que vocês não tenham ressalvas em dizer o que estão pensando sobre um tema ou uma pergunta, para que as respostas sejam as mais ricas possíveis e permitam uma análise mais profunda. Perguntas também são bem-vindas, pois o professor também é um participante da pesquisa.

Em alguns momentos, nós vamos pedir para vocês fazerem algum desenho ou diagrama. Pedimos que vocês deixem os desenhos sobre a mesa. Se por qualquer razão você não quiser deixá-los, não há problema.

- (1) Vamos começar a atividade. Todos se lembram do Palácio do Itamaraty? (caso a resposta seja negativa, mostrar alguma fotografia do edifício)
- (2) O que vocês lembram quando pensam naquele prédio?
- (3) Vocês observaram algum fenômeno óptico na visita ao Itamaraty? Onde?
- (4) Por que a superfície de água leva o nome de “espelho d’água”? Ocorre o mesmo tipo de reflexão que ocorre em um espelho plano comum?
- (5) As imagens vistas no espelho d’água eram nítidas? Por que isso acontece?
- (6) Era possível observar essas imagens em qualquer posição?
- (7) Para conseguir observar essas imagens, o que você fez?
- (8) Era possível ver o Palácio do Itamaraty completamente refletido no espelho d’água? Por que isso acontece?
- (9) O tamanho do espelho d’água é importante para observar o prédio inteiramente refletido nele?
- (10) A cor do fundo da lâmina d’água era escura. Isso é importante? Por que?
- (11) Vamos trabalhar agora com a maquete representativa do Palácio do Itamaraty. Você consegue observar a imagem do prédio inteiramente refletida? Em que posição isso acontece?
- (12) Como você descreve a imagem observada?
- (13) Vamos distribuir agora uma folha de papel. Gostaríamos que cada um de vocês fizesse um esquema explicando a formação da imagem. Vocês podem usar a maquete como referência.
- (14) O Palácio do Itamaraty foi projetado por Oscar Niemeyer. Os críticos de arquitetura dizem que o prédio é uma obra-prima. O espelho d’água é usado em diversos prédios do arquiteto. Você acha que Niemeyer deveria conhecer algum tema de Óptica para elaborar projetos de espelhos d’água? O que seria importante saber, em sua opinião?

(15) Em sua opinião, quais as vantagens de se trabalhar com esse modelo experimental ao invés da visita de campo?

(16) Quais as desvantagens?

(17) A maquete representa bem a realidade? O que você acha que poderia ser mudado?

(18) Por fim, vamos entregar para vocês um exercício didático tradicional de Óptica, desenvolvido a partir da situação estudada hoje. Você tem o tempo que necessitar para resolvê-lo. Essa última parte da atividade é opcional, e o exercício está mostrado a seguir:

A fig. 54 representa a fachada do Palácio do Itamaraty, com 14 m de altura, em frente ao espelho d'água que a envolve, com 16 m de comprimento. Uma pessoa, cujos olhos estão à altura de 1,75 m em relação ao nível da água, encontra-se à distância horizontal X da borda do espelho d'água. Qual o menor valor de X para que a pessoa possa observar a fachada do prédio inteiramente refletida? Considere a superfície da água como um espelho plano ideal.

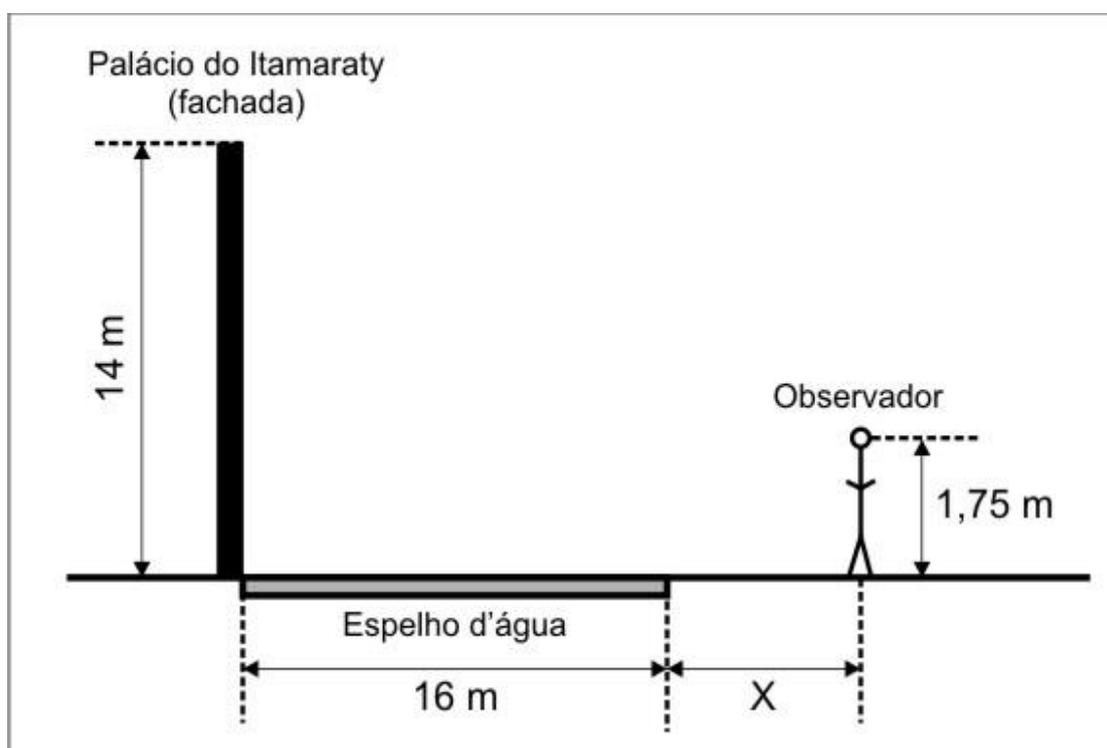


Fig.54 – Esquema geométrico para o questionamento (18) da Atividade Experimental B.

Protocolo de investigação: *Atividade Experimental C*

Obrigado pela presença. Essa é a terceira e última atividade que nós faremos como parte da pesquisa que estamos realizando sobre educação em ciências. De forma mais específica, estamos pesquisando maneiras de se aprender sobre reflexão da luz a partir de estruturas arquitetônicas, usando como exemplos alguns dos prédios que nós observamos na visita de campo. Hoje, trabalharemos com um modelo experimental representando os prédios da Procuradoria Geral da República.

A sua participação é totalmente voluntária, mas tanto vocês quanto seus pais precisam ter assinado o termo de consentimento livre e esclarecido. Se alguém desejar não participar da pesquisa, basta nos comunicar em qualquer momento, seja durante a atividade de hoje ou no futuro, que sua participação será removida. Quero frisar que ninguém será identificado na pesquisa: para cada participante, será atribuído um pseudônimo (nome falso).

Apenas o áudio da atividade está sendo gravado. Somente os pesquisadores terão acesso a essa gravação. Caso você deseje retirar alguma frase ou trecho, basta nos avisar após a gravação. A gravação será transcrita para um texto, para que possamos fazer a análise.

É importante que vocês saibam que não há respostas corretas ou erradas aqui. Não há notas, nenhum relatório a preencher, nem qualquer pontuação extra nas suas atividades escolares normais. Pedimos que vocês não tenham ressalvas em dizer o que estão pensando sobre um tema ou uma pergunta, para que as respostas sejam as mais ricas possíveis e permitam uma análise mais profunda. Perguntas também são bem-vindas, pois o professor também é um participante da pesquisa.

Em alguns momentos, nós vamos pedir para vocês fazerem algum desenho ou diagrama. Pedimos que vocês deixem os desenhos sobre a mesa. Se por qualquer razão você não quiser deixá-los, não há problema.

(1) Vamos começar a atividade. Todos se lembram dos prédios da Procuradoria? (caso a resposta seja negativa, mostrar alguma fotografia dos mesmos)

(2) O que vocês lembram quando pensam naqueles prédios?

(3) Vocês observaram algum fenômeno óptico nas fachadas dos prédios?

- (4) Qual o formato geométrico dos prédios?
- (5) As janelas dos edifícios são totalmente espelhadas. Tratando os prédios como espelhos, como você os classificaria?
- (6) Para representar os prédios, nós vamos usar duas lixeiras cromadas, mas antes, vamos usar apenas uma delas. Colocando a lixeira na horizontal, aproxime um longo papel centimetrado da superfície (ver. fig.55 para uma vista superior da atividade). O que você observou?

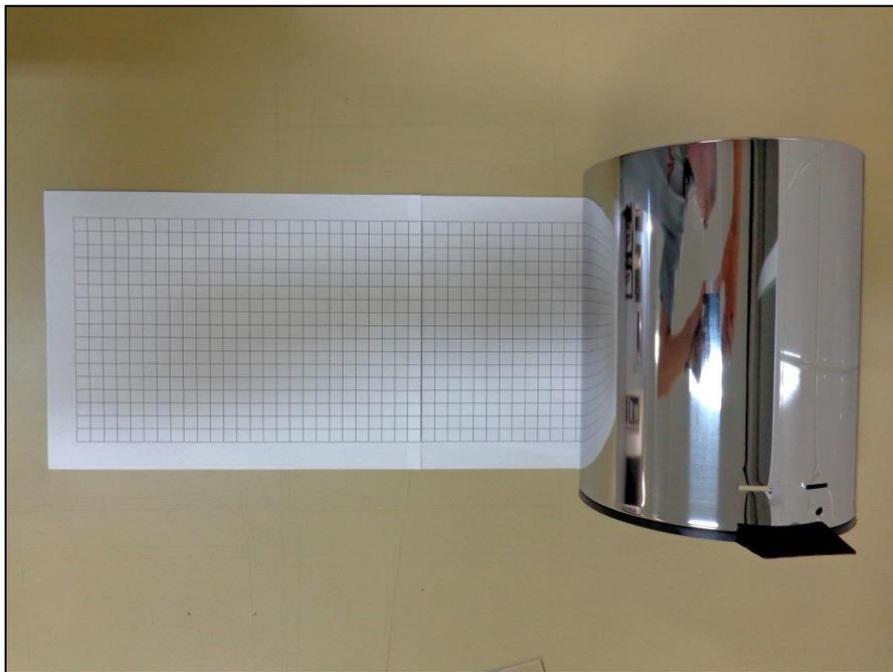


Fig.55 – Detalhamento do questionamento (6) da Atividade Experimental C.

- (7) Se o espelho tivesse outro formato, o que você esperaria observar?
- (8) Por que você acha que isso acontece?
- (9) Vamos fazer um desenho agora, explicando o que ocorreria se raios de luz viessem de um ponto muito distante (raios paralelos) e refletissem no espelho.
- (10) Vamos continuar usando apenas um espelho por enquanto. Coloquem a lixeira na vertical e aproximem a folha de papel com os pontinhos coloridos (semicírculo com mesmo raio da lixeira). Olhem para a imagem de diferentes ângulos (fig.56). O que você observa?

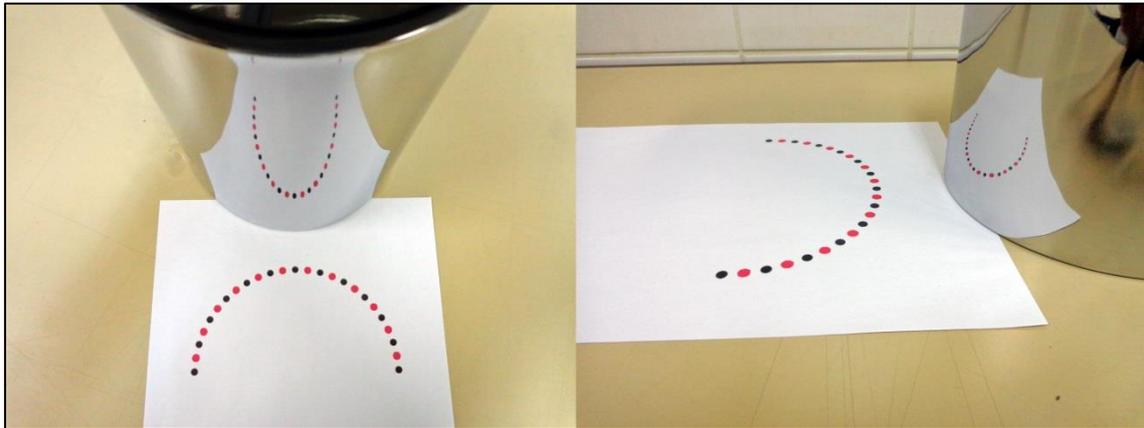


Fig.56 - Detalhamento do questionamento (6) da Atividade Experimental C.

(11) Por que você acha que isso acontece?

(12) Agora vamos usar a maquete (fig. 48). Coloquem as lixeiras sobre os locais onde os prédios principais da Procuradoria estão localizados no mapa. O que você está observando?

(13) Algo digno de nota a se relatar sobre o número de imagens?

(14) Quantas imagens você observou quando fizemos a visita de campo? E na maquete?

(15) Quantas imagens você acha que poderiam existir? Por que não observamos todas elas?

(16) É hora de fazer um novo desenho. Gostaria que você fizesse um esquema explicando a formação das imagens que você está vendo. Faça um desenho para representar como a primeira imagem se forma (a primeira imagem é a maior delas).

(17) Faça agora um novo desenho, para explicar a formação das múltiplas imagens.

(18) Em relação ao objeto, o que pode ser dita sobre a altura das imagens? Ela é modificada? Por que você acha que isso acontece?

(19) Vamos distribuir agora uma figura impressa (fig.57), uma folha de papel de seda, um lápis, uma borracha e uma régua para cada um de vocês. Essa é uma vista superior dos prédios da PGR, obtida no *Google Maps*. O que você observa?



Fig.57 – Na imagem utilizada a partir do questionamento (19) da Atividade Experimental C, é possível observar que raios de luz refletidos na fachada da PGR são projetados no solo. Fonte: *Google Maps*, < <https://www.google.com.br/maps/@-15.8074881,-47.8592644,72m/data=!3m1!1e3?hl=pt-BR> >, acesso 09 maio 2015.

(20) Como você descreveria esses raios? (aqui, buscamos a resposta “raios divergentes”. Caso a mesma não apareça, explicar o conceito).

(21) Por que essa divergência ocorre? A forma do prédio tem algo a ver com isso?

(22) Vocês deverão agora cobrir a figura impressa com o papel de seda. Com lápis e régua, você deverá traçar no papel transparente os prolongamentos dos raios refletidos pelo prédio à direita, verificando onde estão localizados os pontos de maior concentração.

(23) Onde os raios se cruzaram? Foi em um ponto específico?

(23) Esse cruzamento é real ou imaginário?

- (24) Onde seria o foco dessa superfície? (caso o conceito de foco não seja claro para os estudantes, explicar)
- (25) Os prédios da PGR foram projetados por Oscar Niemeyer. Você acha que um arquiteto deveria saber algum tema de Óptica para elaborar projetos de prédios espelhados? O que seria importante saber, em sua opinião?
- (26) Quais as vantagens de se trabalhar com esse modelo experimental ao invés da visita de campo?
- (27) Quais as desvantagens?
- (28) A maquete representa bem a realidade? O que você acha que poderia ser mudado?
- (29) Você acredita que o projeto contribuiu para uma mudança da sua visão sobre a cidade? Se a resposta for positiva, quais mudanças você descreveria?

Apêndice C

Protocolo de investigação definitivo

Protocolo de investigação: *Atividade Experimental*

- (1) Vamos começar a atividade. Todos se lembram dos prédios da Procuradoria? (caso a resposta seja negativa, mostrar alguma fotografia dos mesmos)
- (2) O que vocês lembram quando pensam naqueles prédios?
- (3) Vocês observaram algum fenômeno óptico nas fachadas dos prédios?
- (4) Qual o formato geométrico dos prédios?
- (5) As janelas dos edifícios são totalmente espelhadas. Tratando os prédios como espelhos, como você os classificaria?
- (6) Para representar os prédios, nós vamos usar duas lixeiras cromadas, mas antes, vamos usar apenas uma delas. Colocando a lixeira na horizontal, aproxime um longo papel centimetrado da superfície (ver fig.1 para uma vista superior da atividade). O que você observou?

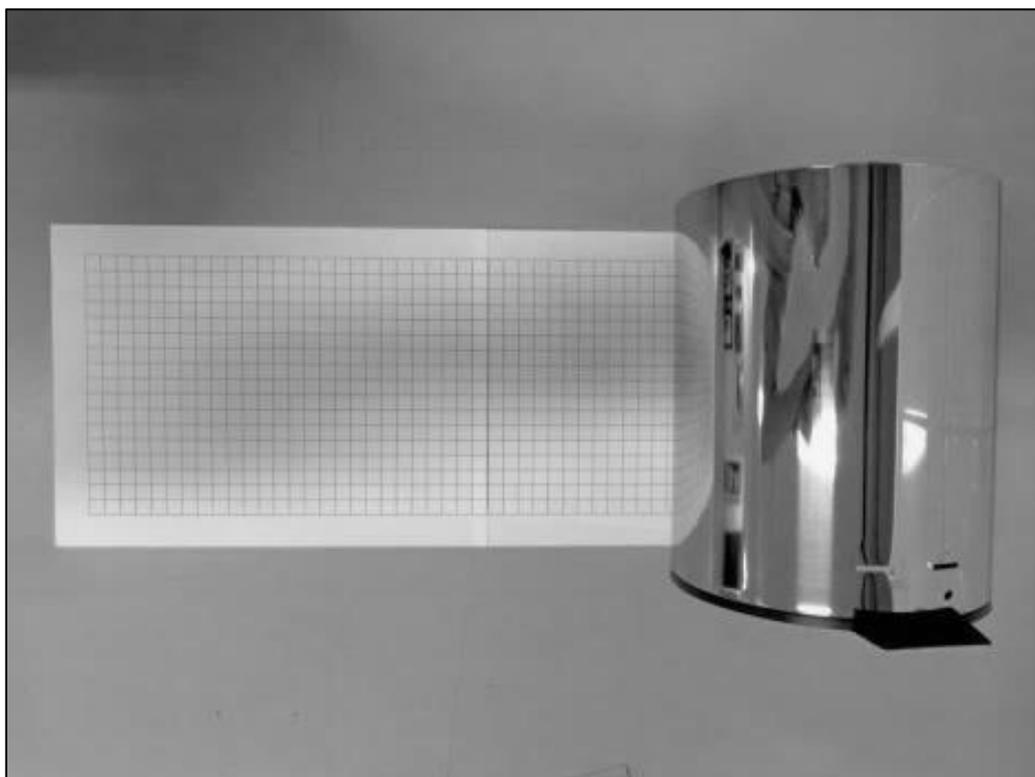


Fig.1 – Detalhamento do questionamento (6) da Atividade Experimental.

- (7) Se o espelho tivesse outro formato, o que você esperaria observar?
- (8) Por que você acha que isso acontece?
- (9) Vamos fazer um desenho agora, explicando o que ocorreria se raios de luz viessem de um ponto muito distante (raios paralelos) e refletissem no espelho.
- (10) Por favor, após fazer o desenho, explique por escrito o seu esquema de formação de imagem. O verso da página pode ser usado para essa explicação.
- (11) Vamos continuar usando apenas um espelho por enquanto. Coloquem a lixeira na vertical e aproximem a folha de papel com os pontinhos coloridos (semicírculo com mesmo raio da lixeira). Olhem para a imagem de diferentes ângulos (fig.2). O que você observa?

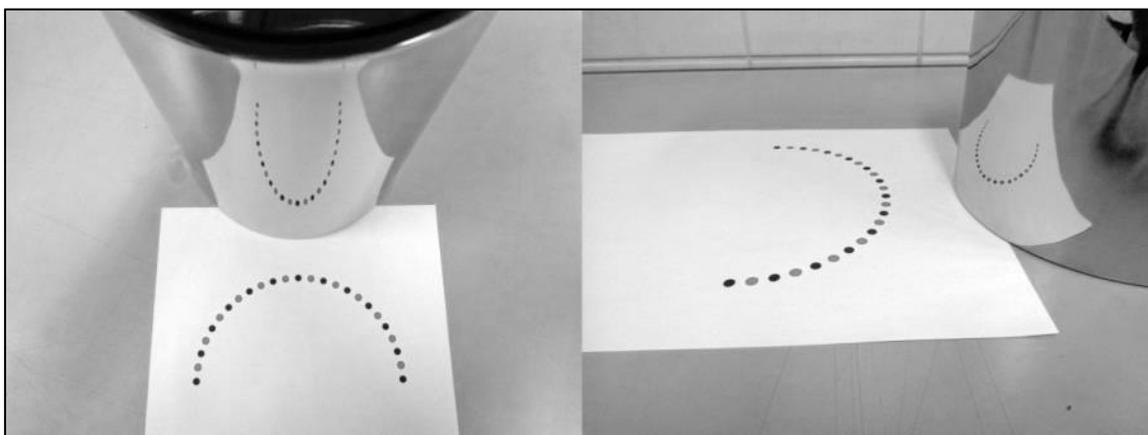


Fig.2 - Detalhamento do questionamento (6) da Atividade Experimental.

- (12) Por que você acha que isso acontece?
- (13) Agora vamos usar a maquete. Coloquem as lixeiras sobre os locais onde os prédios principais da Procuradoria estão localizados no mapa. O que você está observando?
- (14) Algo digno de nota a se relatar sobre o número de imagens?
- (15) Quantas imagens você observou quando fizemos a visita de campo? E na maquete?
- (16) Quantas imagens você acha que poderiam existir? Por que não observamos todas elas?

(17) É hora de fazer um novo desenho. Gostaria que você fizesse um esquema explicando a formação das imagens que você está vendo. Faça um desenho para representar como a primeira imagem se forma (a primeira imagem é a maior delas).

(18) Por favor, após fazer o desenho, explique por escrito o seu esquema de formação de imagem. O verso da página pode ser usado para essa explicação.

(19) Faça agora um novo desenho, para explicar a formação das múltiplas imagens.

(20) Por favor, após fazer o desenho, explique por escrito o seu esquema de formação de imagem. O verso da página pode ser usado para essa explicação.

(21) Em relação ao objeto, o que pode ser dita sobre a altura das imagens? Ela é modificada? Por que você acha que isso acontece?

(22) Vamos distribuir agora uma figura impressa (fig.3), um lápis, uma borracha e uma régua para cada um de vocês. Essa é uma vista superior dos prédios da PGR, obtida no *Google Maps*. O que você observa?

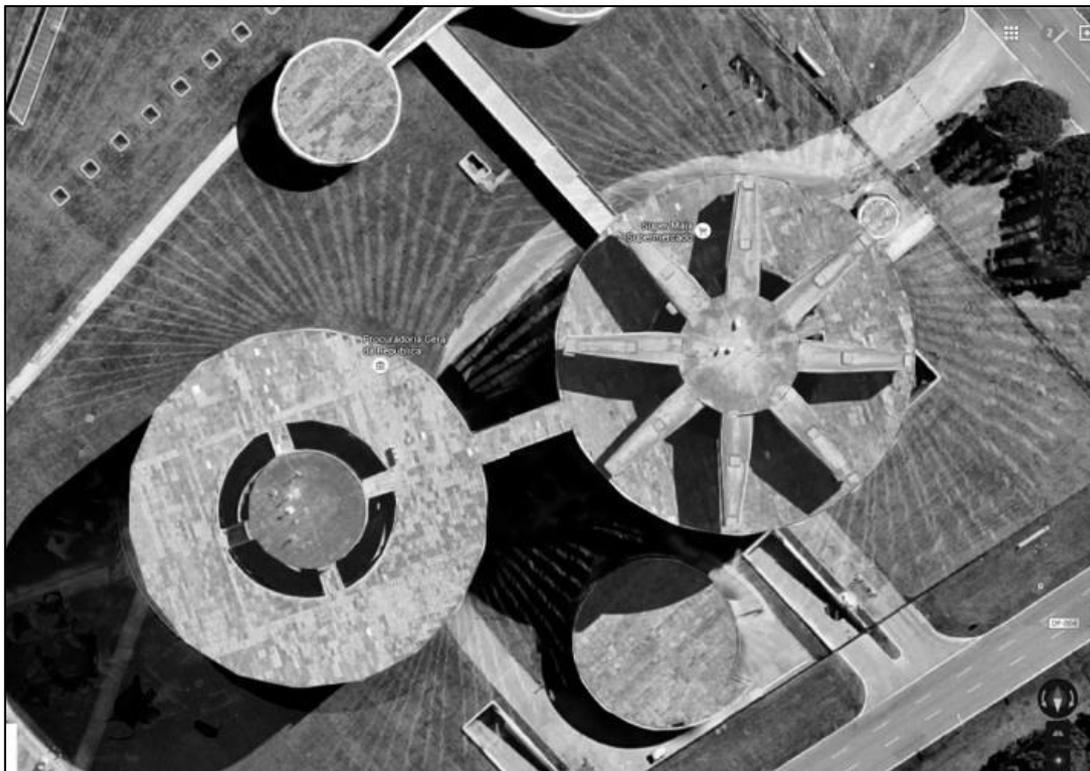


Fig.3 – PGR em uma vista aérea. Fonte: *Google Maps*

(23) Como você descreveria esses raios? (Buscar a resposta “raios divergentes”. Caso a mesma não apareça, explicar o conceito).

(24) Por que essa divergência ocorre? A forma do prédio tem algo a ver com isso?

(25) Vocês deverão agora, com lápis e régua, traçar no papel transparente os prolongamentos dos raios refletidos pelo prédio à direita, verificando onde estão localizados os pontos de maior concentração.

(26) Onde os prolongamentos dos raios se cruzaram? Foi em um ponto específico?

(27) A curva que vocês estão observando é chamada cáustica. Ela pode ser observada em qualquer superfície refletora circular atingida por raios de luz paralelos entre si, inclusive a face interior das lixeiras (nesse momento, mostrar a cáustica de reflexão e comparar com o desenho feito pelos participantes).

(28) O cruzamento dos prolongamentos é real ou imaginário?

(29) Onde seria o foco dessa superfície? (caso o conceito de foco não seja claro para os estudantes, explicar)

(30) Os prédios da PGR foram projetados por Oscar Niemeyer. Você acha que um arquiteto deveria saber algum tema de Óptica para elaborar projetos de prédios espelhados? O que seria importante conhecer, em sua opinião?

(31) Quais as vantagens de se trabalhar com esse modelo experimental ao invés da visita de campo?

(32) Quais as desvantagens?

(33) A maquete representa bem a realidade? O que você acha que poderia ser mudado?

(34) Você acredita que o projeto contribuiu para uma mudança da sua visão sobre a cidade? Se a resposta for positiva, quais mudanças você descreveria?

Apêndice D

Questionário prévio às atividades experimentais

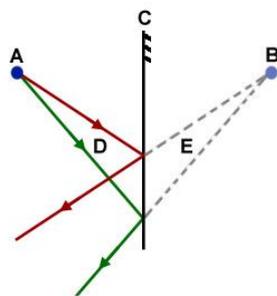
Questionário prévio às atividades experimentais

*Obrigatório

Nome do participante *

Sua resposta

A figura a seguir representa um esquema bastante comum em óptica geométrica. Cada letra representa um elemento desse esquema. Use a figura para responder as questões 1 a 5.



1. A letra A representa: *

- a) Objeto
- b) Imagem
- c) Espelho
- d) Raios de luz
- e) Prolongamento de raios de luz

2. A letra B representa: *

- a) Objeto
- b) Imagem
- c) Espelho
- d) Raios de luz
- e) Prolongamento de raios de luz

3. A letra C representa: *

- a) Objeto
- b) Imagem
- c) Espelho
- d) Raios de luz
- e) Prolongamento de raios de luz

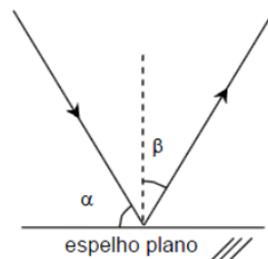
4. A letra D representa: *

- a) Objeto
- b) Imagem
- c) Espelho
- d) Raios de luz
- e) Prolongamento de raios de luz

5. A letra E representa: *

- a) Objeto
- b) Imagem
- c) Espelho
- d) Raios de luz
- e) Prolongamento de raios de luz

6. A figura a seguir ilustra um raio de luz incidindo em um espelho plano e sendo refletido. A linha tracejada é normal à superfície do espelho. Se o ângulo alfa é igual a 37° , a soma alfa + beta vale: *



- a) 18°
- b) 55°
- c) 74°
- d) 90°
- e) 127°

7. Quais imagens abaixo representam situações onde a superfície refletora é equivalente a um espelho plano? Marque todas que você considerar corretas. *



a)



b)



c)



d)



e)



f)

8. A imagem formada em um espelho plano é chamada "virtual". Quais características uma imagem virtual possui? Marque todas aquelas que você considerar corretas. *

- a) Ela está localizada atrás da superfície refletora.
- b) Ela está localizada à frente da superfície refletora.
- c) Ela é invertida em relação ao objeto.
- d) Ela é direita em relação ao objeto.
- e) Ela é formada pelo encontro de raios de luz.
- f) Ela é formada pelo encontro de prolongamentos de raios de luz.

9. A imagem a seguir representa dois espelhos esféricos. Na fotografia à esquerda, a imagem está invertida, e na foto à direita, a imagem está direita, mas é menor que o objeto. Quais são os tipos de espelhos representados, respectivamente? Marque apenas uma resposta. *



- a) Côncavo e côncavo.
- b) Côncavo e convexo.
- c) Convexo e côncavo.
- d) Convexo e convexo.

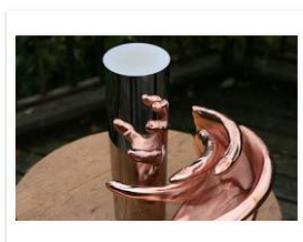
10. Qual dos espelhos abaixo tem formato cilíndrico? *



a)



b)



c)



d)

ENVIAR

Nunca envie senhas pelo Formulários Google.

Apêndice E

Termo de consentimento livre e esclarecido

TERMO DE CONSENTIMENTO LIVRE E ESCLARECIDO

Você está sendo convidado (a) como voluntário (a) a participar da pesquisa:

ESTRUTURAS ARQUITETÔNICAS DE BRASÍLIA: ESPAÇOS DE APRENDIZAGEM SOBRE A REFLEXÃO DA LUZ

JUSTIFICATIVA, OBJETIVOS E PROCEDIMENTOS: O motivo que nos leva a estudar o problema é a comparação entre as diferentes possibilidades de aprendizagem que as estruturas arquitetônicas de Brasília permitem, no âmbito da Óptica geométrica. O aproveitamento do espaço urbano para a aprendizagem de temas da ciência é raro, sendo nossa proposta inédita na área da Óptica. Um dos objetivos da pesquisa se encontra na análise da influência que um trabalho pedagógico desenvolvido a partir de estruturas arquitetônicas pode trazer para a aprendizagem da Óptica, em especial acerca do tema da reflexão luminosa. A partir dessa análise, serão sugeridas diferentes estratégias, atividades pedagógicas e abordagens conceituais nessa fase de formação, visando a proporcionar o aprimoramento da aprendizagem de ciências.

Para a geração dos dados, optamos por protocolos de investigação *learning/teaching* (aprendizagem/ensino): o professor-pesquisador é ativo no processo de investigação. Assim, os participantes não serão apenas questionados sobre seus conhecimentos em Óptica, mas também será estimulada a aprendizagem desse tema durante a pesquisa. A participação dos voluntários se dará em dois momentos: a visita de campo e o trabalho no laboratório de física da instituição de ensino. Essa segunda etapa (trabalho experimental) poderá ocorrer em mais de um encontro.

DESCONFORTOS E RISCOS: Pode haver um desconforto e risco mínimo para os voluntários durante a saída de campo. Nessa etapa da pesquisa, realizada na data prevista _____, no período da manhã (a partir das 8h), iremos nos deslocar a partir da escola para observar alguns prédios na área central de Brasília, a seguir: 1) Procuradoria Geral da República; 2) Setor Bancário Sul, próximo ao prédio Matriz I da Caixa Econômica Federal; 3) Palácio do Itamaraty. O deslocamento será feito por veículo contratado pelos pesquisadores, em comum acordo com a instituição escolar. Como em qualquer situação de trânsito, há riscos inerentes a tal deslocamento. Cabe ressaltar que os participantes deverão sair do veículo em cada um dos locais citados, a fim de fotografar as edificações e discutirem com os pesquisadores suas impressões. Logo, tal exposição também oferece riscos, devido à visita se realizar em período quente e seco em Brasília. Intempéries naturais, tais como chuvas, também podem ocorrer. Já no ambiente do laboratório de física da instituição escolar, local das demais fases da pesquisa, nenhum risco é antevisto.

BENEFÍCIOS: a Óptica geométrica é um tema de grande aplicação no cotidiano, e também faz parte das matrizes de avaliação de processos seletivos para o ensino superior, tais como o PAS (Programa de Avaliação Seriada da UnB) e ENEM (Exame Nacional do Ensino Médio). Assim, a pesquisa permitirá aos participantes novas formas de aprendizagem desse tema ou reavaliação dos seus conhecimentos prévios. A pesquisa busca também desenvolvimento nos participantes de uma nova maneira de olhar a cidade, permitindo não só diagnosticar novas maneiras de se aprender com a cidade, mas também o desenvolvimento de posturas críticas perante o espaço urbano.

GARANTIA DE ESCLARECIMENTO, LIBERDADE DE RECUSA E GARANTIA DE SIGILO: Você será esclarecido (a) sobre a pesquisa em qualquer aspecto que desejar. Você é livre para recusar-se a participar, retirar seu consentimento ou interromper a participação a qualquer momento. A sua participação é voluntária e a recusa em participar não irá acarretar qualquer penalidade ou perda de benefícios. Os pesquisadores irão tratar a sua identidade com padrões profissionais de sigilo. Os resultados da pesquisa serão enviados para você e permanecerão confidenciais. Seu nome ou o material que indique a sua participação não será liberado em nenhuma hipótese para pessoas estranhas à pesquisa. Você não será identificado (a) em nenhuma publicação que possa resultar deste estudo. Uma cópia deste consentimento informado será arquivada na secretaria do Programa de Pós-Graduação em Educação em Ciências da Universidade de Brasília (PPGEduc / UnB) e outra será fornecida a você.

CUSTOS DA PARTICIPAÇÃO, RESSARCIMENTO E INDENIZAÇÃO POR EVENTUAIS DANOS: A participação no estudo não acarretará custos para você e não será disponível nenhuma compensação financeira adicional. Devido à disponibilidade escassa de recursos financeiros para a pesquisa, não será disponibilizado nenhum tipo de seguro contra acidentes aos participantes.

DECLARAÇÃO DO PARTICIPANTE

Eu, _____ fui informada (o) dos objetivos da pesquisa acima de maneira clara e detalhada e esclareci minhas dúvidas. Sei que em qualquer momento poderei solicitar novas informações e motivar minha decisão se assim o desejar. O professor pesquisador JAIR LÚCIO PRADOS RIBEIRO e a professora orientadora MARIA HELENA DA SILVA CARNEIRO certificaram-me de que todos os dados desta pesquisa serão confidenciais.

DECLARAÇÃO DO RESPONSÁVEL PELO PARTICIPANTE

Eu, _____ fui informada (o) dos objetivos da pesquisa acima de maneira clara e detalhada e esclareci minhas dúvidas. Sei que em qualquer momento poderei solicitar novas informações e motivar minha decisão se assim o desejar. O professor pesquisador JAIR LÚCIO PRADOS RIBEIRO e a professora orientadora MARIA HELENA DA SILVA CARNEIRO certificaram-me de que todos os dados desta pesquisa serão confidenciais. Em caso de dúvidas poderei chamar o professor pesquisador JAIR LÚCIO PRADOS RIBEIRO no telefone (61) 9636-2709.

Declaro que concordo em participar desse estudo. Recebi uma cópia deste termo de consentimento livre e esclarecido e me foi dada a oportunidade de ler e esclarecer as minhas dúvidas.

Nome	Participante	Data
------	--------------	------

Nome	Responsável legal	Data
------	-------------------	------

Nome	Pesquisador	Data
------	-------------	------

Apêndice F

Questionário posterior às atividades experimentais

Questionário após Atividade Experimental C (Procuradoria Geral da República)

*Obrigatório

Nome *

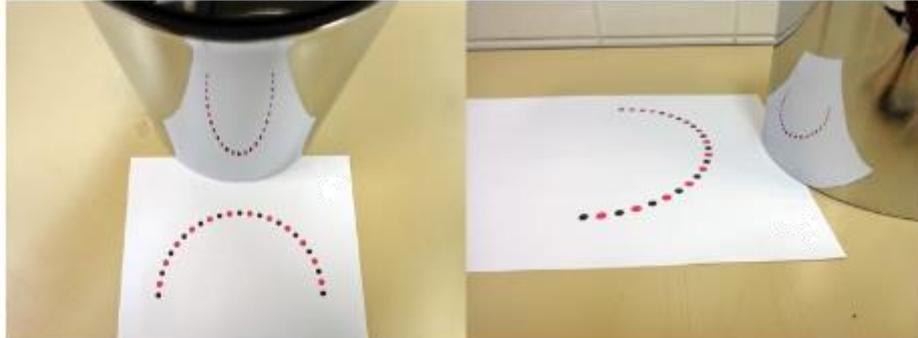
Sua resposta

1) A imagem mostra o Hotel Vdara, em Las Vegas. Logo após sua construção, sua superfície curva foi considerada responsável por um grande aquecimento (de até 20°C) em regiões próximas ao prédio, devido à reflexão da radiação solar nessa superfície. Aproximando-se a fachada desse prédio (mostrada na imagem) por um espelho, este deveria ser: *



- a) Côncavo e esférico.
- b) Côncavo e cilíndrico.
- c) Convexo e esférico.
- d) Convexo e cilíndrico.

2) Abaixo, vemos o mesmo objeto (semicírculo de pontinhos coloridos) refletido em uma superfície cilíndrica. As imagens observadas são diferentes, dependendo da posição do observador. Isso ocorre porque *

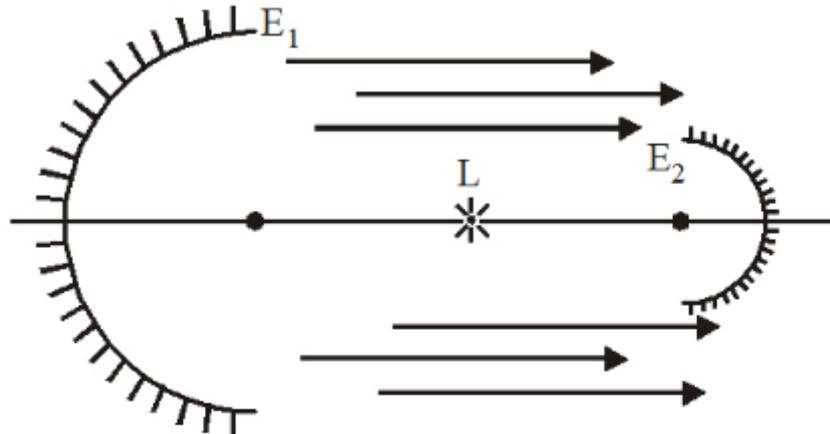


- a) uma superfície cilíndrica é estigmática.
- b) uma superfície cilíndrica é astigmática.
- c) uma superfície cilíndrica espelhada não é capaz de produzir reflexão especular.
- d) uma superfície cilíndrica espelhada não é capaz de produzir reflexão difusa.

3) Uma lâmpada pontual é observada por reflexão em um espelho cilíndrico com eixo vertical. A imagem observada é: *

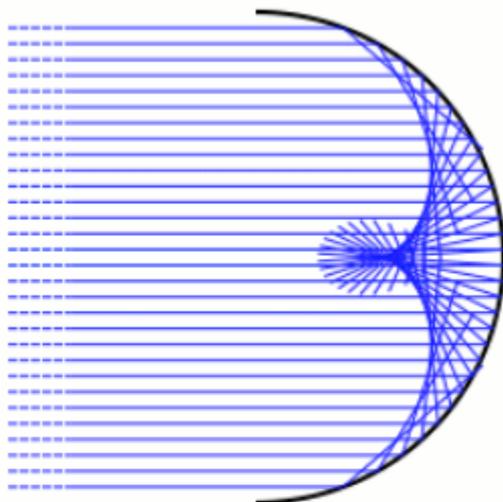
- a) Um ponto.
- b) Uma linha vertical.
- c) Uma linha horizontal.
- d) Uma linha diagonal.

4) Um holofote é constituído por dois espelhos esféricos côncavos E1 e E2, de modo que a quase totalidade da luz proveniente da lâmpada L seja projetada pelo espelho maior E1, formando um feixe de raios quase paralelos. Neste arranjo, os espelhos devem ser posicionados de forma que a lâmpada esteja aproximadamente *



- a) nos focos dos espelhos E1 e E2.
- b) no foco de E2 e no centro de curvatura de E1.
- c) nos centros de curvatura de E1 e E2.
- d) no foco de E1 e no centro de curvatura de E2.

5) O desenho a seguir representa a reflexão da luz solar (raios paralelos) em uma superfície côncava refletora, cuja seção é circular. Os raios se concentram ao longo de uma linha, chamada cáustica. Com relação ao foco dessa superfície, pode-se afirmar que *



- a) ele corresponde ao ponto da curva cáustica do qual todos os raios refletidos divergem.
- b) ele corresponde ao ponto da curva cáustica no qual todos os raios refletidos convergem.
- c) ele corresponde ao ponto da curva cáustica que está mais afastado do espelho.
- d) ele corresponde ao ponto da curva cáustica que está mais próximo do espelho.

ENVIAR

Nunca envie senhas pelo Formulários Google.

This is the end. My only friend, the end.