UNIVERSIDADE DE SÃO

PAULO ESCOLA DE

COMUNICAÇÕES E ARTES

Projeto de Iniciação Científica

REALIDADES, da realidade tangível à realidade ontológica

- Simulação digital de iluminação em superfícies -

Realities, from tangible reality to ontological reality – Digital simulations of lighting on surfaces.

Luca de Andrade Ribeiro - Nº USP 11759852
Orientadora: PROFA. DRA. SILVIA REGINA FERREIRA DE LAURENTIZ

Este trabalho recebeu apoio financeiro do CNPq através da bolsa PIBIC, processo n°: 121770/2021-4

PROJETO VINCULADO AO GRUPO DE PESQUISA REALIDADES (http://www2.eca.usp.br/realidades/), licenciado pelo CNPq, liderado pela Profa. Dra. Silvia Laurentiz, credenciado e sediado na Escola de Comunicações e Artes e no Departamento de Artes Visuais, ECA/USP.

São

Paulo

2022

Agradecimentos

Ao CNPq pela bolsa PIBIC;

à Profa. Dra. Silvia Laurentiz pela orientação meticulosa e dedicada;

ao Grupo REALIDADES pelo suporte e pelas discussões muito proveitosas;

à Brígida Campos pelo contínuo e carinhoso apoio das mais diversas formas;

ao Henrique Levy e ao Theo Rosa por me aguentarem falar por horas sobre cáusticas;

a todos os meus amigos do CAP e de fora dele pela ajuda com a motivação e com os momentos de descontrair;

e aos meus familiares e seu incessante suporte – em especial, obrigado n!, Liu, Caio, Danilo e Nathy!

Agradeço também a J. F. Nye, Alan McRobie e Károly Zsolnai, por fazerem textos e conteúdos os mais acessíveis possíveis, possibilitando que mesmo quem não é especialista na área possa ter alguma chance de entender os temas complexos que abordam.

Obrigado também ao Caio pela ajuda com a matemática e pelos solos de bateria, piano, vaso e afins.

RESUMO

O Projeto do Grupo de Pesquisa Realidades - da realidade tangível à realidade ontológica - objetiva produzir base de reflexão crítica e experimentos práticos sobre diferentes formatos e modelos de representação imagética. Este projeto vinculado, trata de pesquisa sobre simulação digital de um tipo de iluminação em superfícies (cáustica), a partir de programas de renderização 3D. Cáusticas são formas luminosas geradas pela reflexão ou refração da luz em superfícies. Podemos gerar digitalmente esses padrões de luz refratados e/ou refletidos de um objeto. O contraste de suas padronagens é capaz de criar ilusão de tridimensionalidade nessas superfícies, bem como conferir texturas, grafismos e gerar novos modelos de representação. Esta capacidade das cáusticas abre possibilidades tanto estéticas quanto conceituais que se pretende explorar através de estudos teóricos e experimentações práticas.

PALAVRAS-CHAVES: arte digital, renderização, cáustica, luz.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....2

OBJETIVOS E METODOLOGIA.....3

2. RESULTADOS.....4

2.1 Cáusticas enquanto fenômeno físico.....4

2.2. Teoria da catástrofe.....5

2.3 Computação Gráfica.....14

2.3.1 Algoritmos de renderização.....16

2.2 Análises.....21

2.4.1 Naum Gabo.....24

2.4.2 Olafur Eliasson.....27

2.4.3 Alan Jaras.....32

2.4.4 Estúdio Media.Work.....38

3 EXPERIMENTAÇÃO PRÁTICA.....43

3.1 Possibilidades da experimentação prática com a simulação de cáusticas.....43

3.2 Escolha dos algoritmos de renderização.....45

3.3 Primeira série de experimentos – esculturas a partir dos desdobramentos das cáusticas.47

3.4 Segunda série de experimentos – simulação de raios de luz.....55

CONSIDERAÇÕES FINAIS.....69

REFERÊNCIAS.....72

INTRODUÇÃO

Há muitos efeitos luminosos passíveis de simulação em 3D. Dentre eles, focou-se nas cáusticas, cujo exemplo mais clássico são os brilhos no fundo de uma piscina num dia ensolarado. Fisicamente, cáusticas são padrões de luz muito concentrada gerados pela focalização de luz refletida ou refratada (BERRY, 1987) (NYE, 1999). As padronagens dessa distribuição luminosa costumam ser extremamente complexas e visualmente interessantes, além de se modificarem completamente devido a mudanças, mesmo que pequenas, na posição das fontes de luz ou propriedades físicas das superfícies. Ademais, o contraste luminoso das cáusticas gera uma ilusão de profundidade nas superfícies em que são projetadas, o que, junto à complexidade e mutabilidade desse fenômeno físico, faz com que ele tenha uso crescente nas artes, além de na arquitetura, design e computação gráfica. Nessa última área, inclusive, avanços técnicos recentes possibilitam usos extensivos e criativos da simulação desse fenômeno físico para fins artísticos.

Foi com a intenção de se aprofundar nas possibilidades visuais e estéticas, mas também conceituais e poéticas das cáusticas que se realizou a pesquisa teórica e prática, aqui descrita, sobre o fenômeno óptico e sua simulação em 3D.

Iniciou-se o processo com um estudo teórico das cáusticas enquanto fenômeno físico (capítulo 2.1), tarefa desafiadora e que demandou um aprofundamento na matemática (capítulo 2.2) subjacente: a teoria da catástrofe. Com esse entendimento físico e matemático, foi possível encontrar algumas propriedades das cáusticas muito usadas nas artes e outras ainda pouco exploradas por artistas.

Apesar das cáusticas poderem ser simuladas em 3D com uma facilidade cada vez maior, esse processo continua sendo muito desafiador, sendo necessário encontrar as ferramentas corretas – os algoritmos de renderização corretos – para a tarefa. Com esse objetivo, efetuou-se um estudo teórico dos diferentes algoritmos de renderização (capítulo 2.3.1) utilizados para simular cáusticas e sua incidência em superfícies, o que demandou um estudo da computação gráfica em geral (capítulo 2.3), resultando num mapeamento das possibilidades visuais e conceituais que a simulação 3D de cáusticas fornece.

Munido do conhecimento das cáusticas físicas e das ferramentas que possibilitam sua simulação, analisou-se produções artísticas, individuais ou de coletivos, que usam cáusticas, físicas ou digitais (capítulo 2.4). A partir do exame de trabalhos de Naum Gabo (1890-1977)

(capítulo 2.4.1); Olafur Eliasson (1967) (capítulo 2.4.2); Alan Jaras (capítulo 2.4.3); e do estúdio Media.Work (capítulo 2.4.4), encontrou-se diferentes usos e possibilidades das cáusticas e de suas características.

Após isso, foram realizados experimentos práticos em computação gráfica (capítulo 3) com algumas das propriedades das cáusticas levantadas ao longo da pesquisa teórica: uma delas ligada ao entendimento físico de como os raios de luz se propagam no espaço (capítulo 3.4) e outra ligada à teoria da catástrofe, à matemática por trás das cáusticas e outros fenômenos (capítulo 3.3). Por serem feitos em computação gráfica, o estudo teórico sobre ela teve um grande impacto, tanto em aspectos práticos – afinal, indicou as melhores ferramentas para a simulação digital do fenômeno (capítulo 3.2) –, quanto conceituais, das possibilidades únicas que a computação gráfica e suas limitações permitem (capítulo 3.1).

OBJETIVOS E METODOLOGIA

O objetivo principal foi entender, de forma mais aprofundada, o fenômeno físico das cáusticas: o que são, quais suas causas, como se comportam e por que se comportam dessa forma para, a partir desse entendimento, encontrar as possibilidades plásticas, poéticas e conceituais que as cáusticas e sua simulação em 3D oferecem, pensando sempre na utilização dessas possibilidades em produções artísticas.

Para que seu uso em trabalhos digitais fosse mais proveitoso e eficiente, o segundo objetivo foi achar as melhores ferramentas e técnicas para simular cáusticas. Como último objetivo, pretendeu-se a realização de trabalhos artísticos experimentais com cáusticas e computação gráfica, tendo como base o aprendizado técnico e teórico adquirido.

Para cumprir com esses objetivos, num primeiro momento, foi feita uma pesquisa bibliográfica sobre as cáusticas enquanto fenômeno físico. Simultaneamente, o mesmo procedimento foi utilizado para o estudo da computação gráfica no geral e de algoritmos e ferramentas de renderização de amplo uso e capazes de simular cáusticas. Os algoritmos de renderização examinados foram *path-tracing*, *light-tracing*, *bidirectional path-tracing*, *photon mapping* e *vertex connection and merging*; tendo como base para a escolha a análise de Meneghel e Netto (2015).

A partir do conhecimento físico sobre as cáusticas e – no caso dos trabalhos digitais – também no conhecimento adquirido sobre computação gráfica e seu funcionamento, efetuou-

se a análise de obras de alguns artistas e coletivos que utilizam cáusticas, simuladas ou não: Naum Gabo (1890-1977); Olafur Eliasson (1967); Alan Jaras; e o estúdio Media.Work.

Após a etapa teórica, foram realizados experimentos práticos, focando em algumas possibilidades visuais, conceituais e poéticas das cáusticas e de sua simulação em 3D. Essas viabilidades foram levantadas por: estudos teóricos, tanto do fenômeno físico quanto de sua simulação; análises das produções artísticas que as empregam; e reflexões suscitadas pelo processo de pesquisa em geral.

Por fim, os resultados, tanto práticos quanto teóricos, foram documentados, na forma de textos e imagens, no site do grupo REALIDADES[1]. Além disso, ocorreu divulgação de vídeos e imagens de experimentos práticos no *YouTube*[2] e *Instagram*[3].

2. RESULTADOS

2.1 Cáusticas enquanto fenômeno físico

Um exemplo comum de cáusticas são os brilhos no fundo de uma piscina. Nela, “water’s wavy surface can be thought of as a series of positive and negative lenses. The positive lenses focus sunlight onto the bottom [a piscina] creating the bright network [a cáustica]. The negative lenses refract light out of the beam and increase the contrast of the network” (LYNCH; LIVINGSTON, 2001. p. 93). A cáustica são focalizações, distribuições de luz refletida ou refratada em formatos.

Numa definição mais precisa, a cáustica é o envelope (no sentido matemático do termo) formado pela focalização de raios de luz ─ refletidos ou refratados ─ em uma singularidade (BERRY, 1987, p. 479). Em outras palavras, a cáustica é uma forma luminosa, uma *curva*, sendo que cada ponto dessa é formado pela intersecção de dois ou mais raios de

---

1 A pesquisa está vinculada ao grupo de pesquisa REALIDADES: DA REALIDADE TANGÍVEL À REALIDADE ONTOLÓGICA, que estuda diferentes modelos de representação e é coordenado pela Profª. Drª. Silvia Laurentiz. Além da divulgação da pesquisa no site do grupo, os resultados parciais da pesquisa bibliográfica e das análises foram apresentados ao REALIDADES no dia 31 de março de 2022.

2 Vídeos mostrando os experimentos de vários pontos de vista diferentes estão disponíveis no canal de YouTube madeinluca, disponível em: <https://www.youtube.com/channel/UCL5_NpWP9u_AY0MnXrSskIg>. Acesso em: 6 set. 2022.

3 Imagens e vídeos dos experimentos estão disponíveis no perfil @lucaandraderibeiro, disponível em: <https://www.instagram.com/lucaandraderibeiro/>. Acesso em: 6 set. 2022.

luz que sofreram algum tipo de interferência. As regiões brilhantes da cáustica tem brilho intenso justamente pois reúnem vários raios de luz num mesmo espaço (NYE, 1999, pp. 1-2).

A cáustica distribui a luz, é a focalização dela em um formato, a singularidade, mas esse não precisa só ser um ponto infinitesimal como seria para a cáustica de uma lente perfeita: suas formas podem ser muito diversas, como a observação do fundo de uma piscina e seus intrincados padrões luminosos logo revelará. Entretanto, até recentemente, o interesse esteve quase que exclusivamente em torno das cáusticas que se aproximam de um ponto, apesar de sua raridade na natureza, estando restritas praticamente aos olhos de animais e às lentes fabricadas por humanos. E o motivo é bastante prático: essa focalização em um ponto é a necessária para a formação de uma imagem por uma lente e não aquela que distribui a luz num formato complexo no fundo de uma piscina num dia ensolarado (NYE, 1999, p. 1). Até havia interesse, por parte de cientistas ligados à área de óptica, em algumas cáusticas de formatos variados, que foram enquadradas em extensivos sistemas de classificação de aberrações de lente (*lens aberrations*). Entretanto, como o nome dos sistemas indica, essas cáusticas são entendidas como falhas nas lentes, perturbações do almejado foco como ponto, e que dependem de lentes e suas condições muito específicas de simetria cilíndrica para ocorrer (BERRY, 1987, p. 480). Foi justamente esse tipo de cáustica e sua relação inseparável com as lentes que interessou o artista Olafur Eliasson, o qual fez uso delas em alguns de seus trabalhos recentes, como será abordado mais adiante.

Entretanto, as cáusticas genéricas ─ capazes de serem geradas por objetos sem simetria, passíveis então de serem encontradas na natureza com maior facilidade ─ só começaram a ser estudadas sistematicamente quando a matemática necessária para entender e melhor descrever suas geometrias já havia sido desenvolvida. Essa matemática é a teoria da catástrofe (BERRY, 1987, p. 479).

2.2. Teoria da catástrofe

Desenvolvida ao longo dos anos 1960 e 1970 pelo matemático René Thom e publicada em 1972, teoria da catástrofe usa da topologia para descrever fenômenos cujos parâmetros geradores mudam gradualmente, mas que acabam criando variações bruscas de comportamento (ZEEMAN, 1976, p. 65). Fenômenos como a estabilidade de um navio podem ser de difícil previsão, mas a teoria da catástrofe consegue descrever a interação dos parâmetros e forças desses fenômenos como superfícies suaves, cujas dobras descrevem as

descontinuidades deles, suas mudanças bruscas. Essas dobras por trás dessas modificações repentinas são as catástrofes que dão nome à teoria (MCROBIE, 2017) e que podem, para processos regidos por não mais do que quatro parâmetros diferentes, ser divididas em sete principais catástrofes elementares (ZEEMAN, 1976, p. 65) (NYE, 1999, p. 43).

Dessas, as mais simples e facilmente encontráveis nos fenômenos são a de *fold* (dobra) e de *cusp* (cúspide)[4]. A primeira pode ser pensada como o vértice de uma parábola. Ele marca uma clara mudança de comportamento: em vez de subir, a parábola agora desce, por exemplo. Esse "ponto de virada" é a singularidade, a catástrofe. A catástrofe de *cusp* se assemelha a um triângulo alongado formado por duas *folds* que se encontram numa ponta afiada (fig. 1), um formato conhecido como a *3/2 power law* (MCROBIE, 2017, p. 16). Seu desdobramento ─ a superfície cujas dobras, ao serem planificadas, resultam na catástrofe ─ pode ser pensado como uma saliência montanhosa que gradualmente diminui até um ponto crítico, correspondente a sua ponta afiada, em que se torna um declive suave (MCROBIE, 2017, p. 14), como mostra a fig. 2. A *cusp* ilustra uma bifurcação de comportamento: a partir desse ponto crítico, com mudanças *pequenas* nos parâmetros, o comportamento pode mudar *drasticamente* para diferentes estágios possíveis, correspondentes a cada uma das três folhas do desdobramento que se sobrepõem (ZEEMAN, 1976, pp. 65-67).

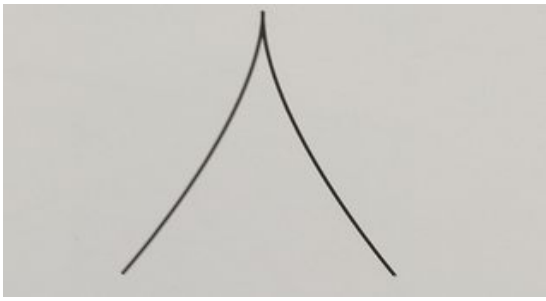

Figura 1 – catástrofe de cusp
Fonte: (MCROBIE, 2017, p. 15)

4 Optou-se pelo uso dos termos em inglês por serem aqueles presentes na literatura consultada sobre cáusticas

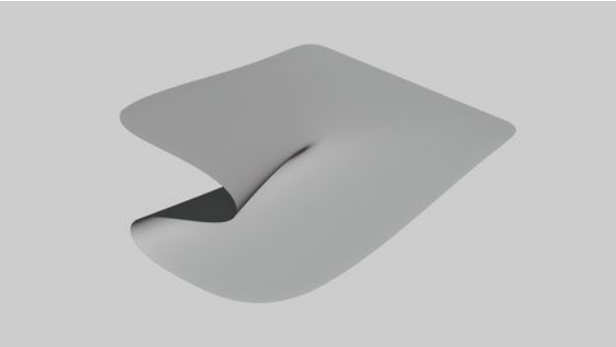

Figura 2 – desdobramento da catástrofe de cusp

Fonte: imagem criada pelo autor inspirada em (MCROBIE, 2017, pp. 14-15)

As demais catástrofes elementares ─ *swallowtail*, *butterfly*, *hyperbolic umbilic*, *elliptic umbilic* e *parabolic umbilic* ─ podem ser entendidas como junções de um número cada vez maior de *folds* e *cusps* numa conformação específica. O formato da singularidade e desdobramento das *cuspoids* (*fold, cusp, swallowtail* e *butterfly*), que são de mais fácil visualização, podem ser vistas nas figs. 3 e 4 respectivamente. Conforme aumentam de complexidade, as catástrofes tornam-se também mais raras de serem encontradas em fenômenos (MCROBIE, 2017, p. 31).

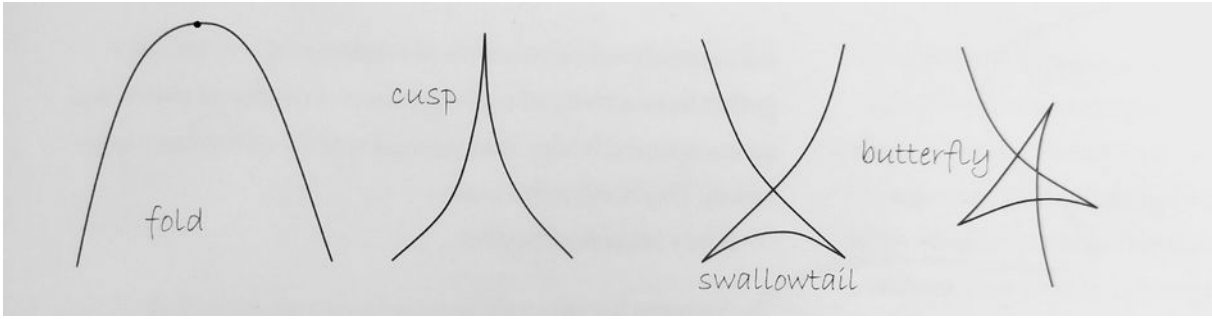

Figura 3 – singularidades das catástrofes cuspoids

Fonte: versão modificada de (MCROBIE, 2017, p. 3)

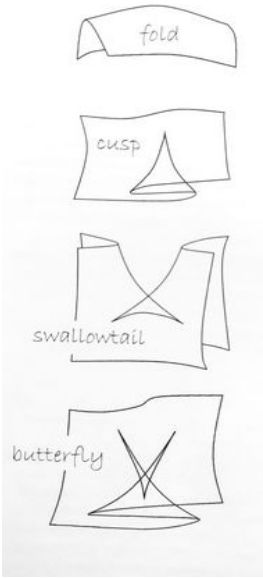

Figura 4 – desdobramentos das catástrofes *cuspoids*

Fonte: (MCROBIE, 2017, p. 46)

Apesar de sua notável utilidade em áreas como engenharia e física, a teoria recebeu muitas críticas pela aplicação em biologia e sociologia, muitas vezes bastante especulativa e resultando em modelos inapropriados. No entanto, a teoria em si está alicerçada em uma base matemática sólida e suas aplicações em determinadas áreas ─ como astronomia e óptica, por exemplo ─ forneceram e fornecem resultados muito valiosos e amplamente respeitados (NYE, 1999, p. 5) (MCROBIE, 2017, p. 33) (BERRY, 1980, p. 260).

Para análise das cáusticas, essa teoria é uma ferramenta muito útil. A começar, as catástrofes descrevem o próprio formato delas ─ como pode ser visto nas cáusticas de uma gota d'água (fig. 5), recheada de *folds* (as linhas) que se juntam em *cusps* (as pontas). Com raras exceções, "the form of almost every caustic is stably described by one of the catastrophes" (BERRY, 1987, p. 489), que funcionam como uma tabela periódica das principais formas encontráveis. Duas ou mais catástrofes ─ análogas a átomos ─ podem se unir e gerar cáusticas mais complexas, análogas a moléculas, e essas, por sua vez, podem se combinar em estruturas regulares ou aleatórias (análogas a sólidos ou líquidos) chamadas de *caustic networks* (redes de cáusticas) (BERRY, 1987, pp. 491-492). São essas redes complexas que se vê no fundo de uma piscina; e suas configurações podem ser tão intrincadas que dificultam uma descrição precisa de sua forma e comportamento, especialmente no caso das *caustic networks* não regulares (NYE, 1999, p. 244). Apesar disso, mesmo sem modelos para certas conformações dos brilhos que estampam o fundo de

piscinas, sabe-se que tais conformações são compostas principalmente por combinações de alguns tipos de formas primordiais, as sete catástrofes elementares.

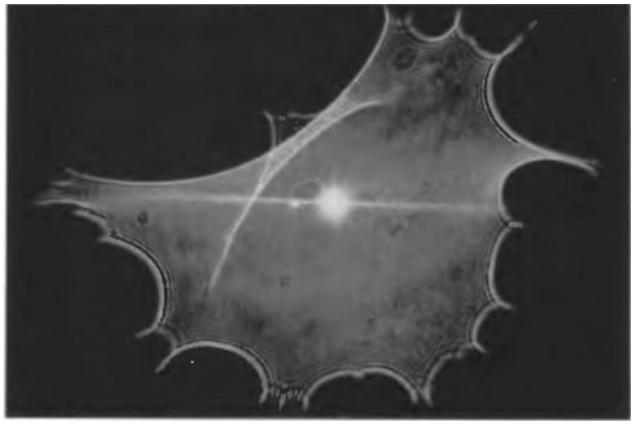

Figura 5 – cáustica gerada por uma gota d'água vista através de um microscópio

Fonte: (NYE, 1999, p. 28)

Para aprofundar a relação entre cáusticas e catástrofes, Nye (1999) primeiro apresenta um exemplo bidimensional. Propõe o imaginar de diversos raios paralelos incidindo numa superfície refratora. Essa distorcerá os raios e a direção para qual passarão a apontar dependerá das inclinações das partes da superfície dela. Como pode ser visto na fig. 6, próximo da superfície refratora a densidade dos raios foi apenas ligeiramente modificada ─ caso fosse colocado um anteparo difuso, os brilhos estariam apenas ligeiramente mais concentrados em certas regiões ─, mas conforme a distância aumenta, essa variação de densidade também cresce, até um dado momento em que os raios passam a se cruzar, e nesses pontos de intersecção que se tem a cáustica (NYE, 1999, pp. 12-13). Essa em específico tem um formato de uma *cusp*. Todavia, nesse cenário 2D e em que o anteparo difuso está paralelo à superfície refratora, isso não pode ser visto na projeção da cáustica sobre ele: ela será apenas um ponto luminoso ou dois ou nenhum, e isso dependerá da distância entre anteparo e refrator. Com distâncias pequenas, não há cáustica: a luz não foi focalizada o bastante; com o anteparo na altura da ponta afiada da *cusp*, a singularidade gerada é um único ponto muito brilhante, composto pela focalização de três raios de luz; conforme se aumenta ainda mais a distância do anteparo ao refrator, essa ponta da *cusp* repentinamente vira dois "braços", duas *folds*: o que era um ponto brilhante subitamente se bifurca em dois, cada qual formado pela focalização de dois raios de luz (NYE, 1999, pp. 12-13). "Thus, the fold and the cusp are associated with two kinds of focusing, involving different numbers of rays, two and three, respectively. The number of rays is called the *multiplicity*" (NYE, 1999, p. 14) (grifo do autor) e tem a ver com quantas dobras cada catástrofe elementar faz sobre si mesma. Com

esse exemplo, fica claro que as catástrofes não descrevem apenas o formato da singularidade no espaço, mas o comportamento, de maneira mais geral, dos raios que são focalizados nela.

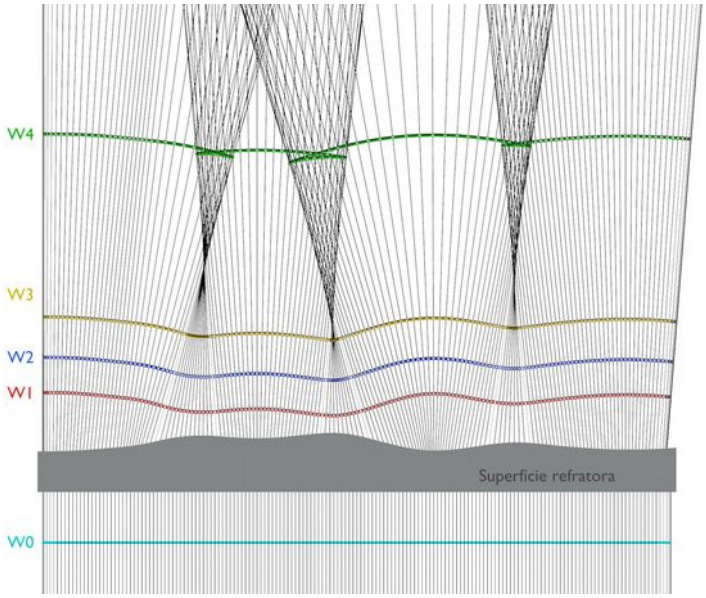

Figura 6 – perturbações nos raios (retas pretas) e *wavefronts* (curvas coloridas) geradas pela refração

Fonte: o autor a partir do exemplo de Nye (1999, p. 28)

Esse fenômeno óptico pode ser entendido também em termos de ondas. Superfícies perpendiculares aos raios podem ser traçadas e recebem o nome de *geometrical optics wavefronts* (frentes de onda da geometria óptica)[5]. Quando os raios de luz incidem paralelamente, essa superfície será plana, mas sofrerá distorções após o contato com o refrator ─ a fig. 6 ilustra, no exemplo dado por Nye, esses dois estágios, marcados como W0 e W1 respectivamente. A amplitude dessa distorção será baixa no estágio inicial imediatamente após a refração (W1), mas sucessivamente aumentará (W2 e W3 na fig. 6) até um momento em que essa *wavefront* apresentará vincos e sobreposições (W4 na fig. 6). São essas singularidades que se apresentam como cáusticas quando projetadas numa superfície. Isso é de extrema relevância pois consegue-se aplicar a teoria da catástrofe para calcular, a partir da *wavefront* inicial (W1), quais cáusticas serão geradas num dado ponto no espaço (NYE, 1999) (BERRY, 1987).

5 “Because of diffraction they are different from the 'true wavefronts' of wave optics, defined as the surfaces of equal phase of the wave disturbance. There can only be one true wavefront at a given point, because the wave disturbance is single valued, whereas there are as many geometrical optics wavefronts as there are rays.” (NYE, 1999, p. 17)

Tratou-se até agora de cáusticas num espaço 2D, entretanto, pode-se facilmente transportar as conclusões e até o exemplo do Nye para três dimensões. Quanto a esse exemplo, basta prolongar a superfície refratora na direção normal ao papel, como ilustra a fig. 7 – que também modifica o ponto de vista para facilitar a compreensão. Caso fosse colocado o anteparo difuso na frente dessa estrutura, agora 3D, a cáustica gerada não seria mais um ponto e sim uma linha mais ou menos intensa. Contudo, inclinando (mesmo que levemente) o anteparo no eixo X (em vermelho), seria possível ver nele a tradicional singularidade regida pela *3/2 power law*, a *cusp*. É exatamente isso que acontece numa xícara de café (fig. 8). Os raios de luz são refletidos pela borda interna da louça e formam uma cáustica de *cusp* no espaço mais abaixo, mas essa é parada por um anteparo, o fundo da xícara, resultando na projeção da *cusp* sobre ele. A cáustica está no espaço, mas com um anteparo inclinado, pode-se "capturar" seu formato na superfície dele. Uma propriedade interessante das cáusticas genéricas que pode ser intuída a partir disso[6] é que as características principais do formato dela permanecerão mesmo após mudanças nos seus parâmetros geradores, como uma modificação na inclinação da superfície em que incidirá. *Cusps* continuam a ser *cusps* ─ continuam obedecendo a *3/2 power law* ─ independente da inclinação das superfícies em que são projetadas; as únicas exceções são quando o anteparo ou é paralelo às *wavefronts*, o que, como mencionado, gera projeção de apenas linhas, ou faz 90° com ele, o que resulta em nenhuma cáustica sendo projetada (NYE, 1999, pp. 50-52). O mesmo vale para outras cáusticas genéricas, definidas por outras catástrofes elementares.

6 Há também uma prova matemática (NYE, 1999, pp. 52-53).

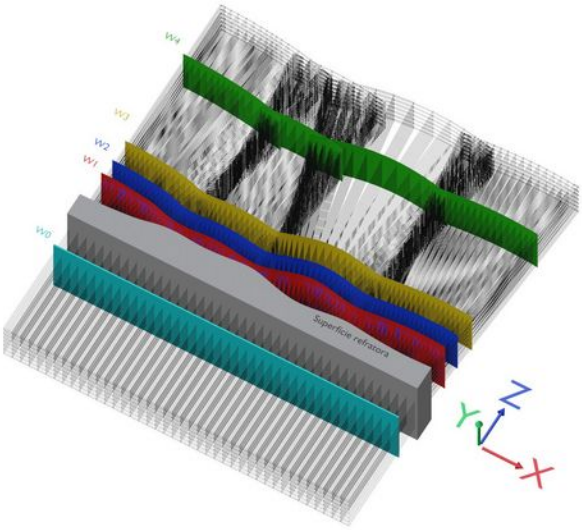

Figura 7 – representação tridimensional das perturbações nos raios (retas pretas) e *wavefronts* (superfícies coloridas) geradas pela refração

Fonte: o autor

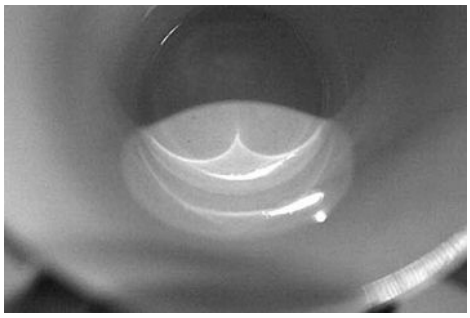

Figura 8 – cáustica de uma xícara de café

Fonte: imagem de Paul Venter[7]

"We describe this persistence of the caustic under perturbation by saying that it is *structurally stable*" (NYE, 1999, p. 11) (grifo nosso) e dessa estabilidade estrutural há outros exemplos com alterações em outros parâmetros, como o formato da superfície refratora ou reflexiva. A xícara não precisa ser perfeitamente cilíndrica para gerar uma *cusp*, um copo de plástico ligeiramente deformado resulta na mesma cáustica. Muito diferente do que acontece com um espelho parabólico, que com pequenas deformações já perde o foco por completo (NYE, 1999, pp. 9-12). Há, claro, um limite para o tamanho das perturbações, mas tendo esse sido ultrapassado, o resultado provavelmente será uma cáustica regida por outra catástrofe mais ou menos complexa[8] e que também terá estabilidade diante de pequenas perturbações (NYE, 1999, p. 46).

7 Disponível em: <http://en.wikipedia.org/wiki/File:Caustic00.jpg> . Acesso em: 6 set. 2022.

A cáustica é uma forma 3D no espaço, que em situações normais só pode ser vista quando projetada sobre uma superfície, quando planificada nela. Apesar disso, quando isso ocorre, ela

> has a curious three-dimensional appearance, each fold caustic being seen as if it were a continuous luminous sheet smoothly folded over itself. This illusion seems to be because the distribution of light near a fold caustic happens to be similar to that associated with a smoothly folded sheet. However, the sheet 'seen' in this way is not the fold caustic viewed in three dimensions (NYE, 1999, p. 57)

Trata-se apenas de uma impressão gerada pela variação de intensidade luminosa nas imediações da cáustica.

Quanto a essa variação, a “density of rays rises inversely as the square root of the distance from the caustic” (NYE, 1999, p. 13), sendo infinita na cáustica, o que está por trás de sua alta luminosidade. Todavia, essa infinitude só é válida do ponto de vista da óptica geométrica: levando em conta o comportamento da luz como onda, nota-se que as singularidades, as linhas das cáusticas, tem intensidade grande, mas *oscilatória* e *finita*, o que pode ser observado tanto nos modelos teóricos quanto nos experimentos práticos (MCROBIE, 2017, p. 72). Essas oscilações recebem o nome de *diffraction* patterns (padrões de difração) e perpassam toda a cáustica: são um elemento básico de sua estrutura; e são regidos pelas mesmas catástrofes elementares que ela (NYE, 1999, p. 3). Esses *diffractions patterns* são pequenos, o que torna sua visualização a olho nu difícil. Em fotos de cáusticas muito ampliadas, por outro lado, o fenômeno é visível e confere às cáusticas uma aparência distinta, a qual foi muito explorada pelo artista Alan Jaras, o qual será analisado mais adiante.

Embora façam parte da estrutura das cáusticas, esses *diffraction patterns* não são simulados por boa parte dos renderizadores 3D. Mesmo com essa limitação, esses últimos são ferramentas muito poderosas, tanto para a simulação de cáusticas e outros efeitos de luz em superfícies visando acurácia física, quanto para a simulação que busca justamente o fisicamente impossível, mas matematicamente viável. Para entender as possibilidades dos renderizadores, é necessário aprofundar-se no seu funcionamento.

---

8 No exemplo do copo de café feito de plástico, uma deformação muito acentuada poderia gerar tanto uma singularidade mais simples, uma *fold*, como uma mais complexa, como a *swallowtail* ou *butterfly* (NYE, 1999, p. 46).

2.3 Computação Gráfica

Renderizadores são programas que transformam um universo 3D simulado em imagens 2D através de um processo de planificação similar àquele efetuado por uma câmera, mas que possui uma diferença crucial. Em vez dos raios de luz vindos de um objeto físico chegarem num filme (ou no sensor de uma câmera digital) e, com isso, serem planificados numa imagem 2D, os renderizadores não dependem de nenhum objeto físico ou raio de luz para gerarem imagens: são baseados num processo algébrico que necessita apenas de coordenadas. "If one wants to depict an actual object, the first step is to abstract its shape from the real world and place it in the imaginary world of a selected coordinate space" (BINKLEY, 1989, p. 15). Todos os objetos numa cena 3D situam-se num sistema abstrato de coordenadas, em que cada um de seus pontos pode ser descrito como um conjunto de três valores (X, Y, Z). Da mesma forma, o plano de visão é transformado num *grid* de coordenadas, com cada um de seus pontos correspondendo a um *pixel* da imagem final. Para cada um desses, o algoritmo "traça" um raio e calcula com qual ponto, com qual coordenada dos objetos em cena, ele intersecciona. Mas esse traçar não é literal e sim conceitual ─ nenhum raio foi de fato traçado ─, uma vez que a resolução dessa intersecção é por equações, de forma puramente algébrica (BINKLEY, 1989, p. 15).

A natureza digital do computador faz com que ele possa trabalhar "with conceptual structures and numbers that have no preferred or canonical material expression" (BINKLEY, 1989, p. 15), sendo possível simulações e processos com os mais variados tipos de dados e não apenas coordenadas espaciais. Renderizadores não precisam limitar-se apenas ao processo de planificação. Luz, sombra, profundidade de campo, *motion blu*r e as propriedades físicas dos materiais ─ como a maneira como refletem, absorvem ou refratam a luz ─ podem ser simuladas, atingindo resultados complexos e, muitas vezes, bastante fiéis a capturas fotográficas do fenômeno real.

Uma das características da computação gráfica é a capacidade do artista e, em alguns casos, também do espectador, de manipular os dados operados nas simulações (LAMBERT, 2011, p. 440). Essa capacidade se estende para uma infinidade de parâmetros, sendo possível controlar: o formato e distribuição dos vértices dos modelos 3D; a iluminação da cena; as condições atmosféricas dela; as propriedades físicas dos objetos dela; a posição da câmera, do plano de visão… Além disso, o grau de controle de cada um desses parâmetros é profundo, sendo factível, por exemplo, modificar as propriedades físicas – como as micro texturas que

influenciam na reflexão de um objeto metálico – com uma precisão inalcançável no mundo físico.

Ainda assim, o grande poder da computação gráfica está não apenas na capacidade de simular fenômenos físicos existentes com imenso grau de controle e acurácia, mas no poder de gerar efeitos e cenários fisicamente impossíveis, mas matematicamente viáveis, válidos dentro das regras matemáticas que regem a simulação (LAMBERT, 2011, p. 442). A 'câmera' da computação gráfica não precisa se comportar como as câmeras reais, pode estar em posições, na cena 3D, que seriam impraticáveis numa análoga no mundo material; da mesma forma, a renderização 3D não precisa seguir as regras de perspectiva linear: os algoritmos de renderização podem ser modificados para criar perspectivas hiperbólicas ou ainda de outros tipos. Os mesmos algoritmos que delimitam um comportamento da luz similar ao do mundo físico na cena 3D podem ser usados para criar cenários fisicamente impossíveis em que, por exemplo, objetos reflitam mais luz do que recebem.

Todas essas impossibilidades físicas são alcançáveis "because the digital image is intangible, [...] and process-driven rather than physical" (LAMBERT, 2011, p. 440). Tal qual a imagem mental, aquela quando "one visualizes the scene in the mind's eye" (Ibid., p. 439), a imagem gerada por computador permite a invocação, disposição e edição, com imensa liberdade, de objetos e cenas em espaços não físicos (Ibid., p. 439). Isso possibilita um controle tão imenso, tanto em quantidade quanto em profundidade, que é simplesmente inalcançável na materialidade. Mas não é infinito: todos os elementos "can be freely deleted, rearranged, transformed and returned to their original state, *provided that the software allows all these steps*" (Ibid., p. 441) (grifo nosso).

Os programas possuem, todos, limitações. Há processos que não podem ser feitos e efeitos (luminosos, por exemplo) que não podem ser alcançados ou que, para isso, demandariam de tempo e poder de processamento em quantias inviáveis. Combinações de *softwares* são possíveis e o artista pode construir seus próprios programas, indo além das possibilidades e limitações já apresentadas pelas ferramentas que tem à disposição (LAMBERT, 2011, p. 441), entretanto, isso não é sempre factível e, alguns limites são, na prática ou até mesmo em teoria, intransponíveis com *hardware* e algoritmos atuais. Essas barreiras fazem-se presentes na renderização de cáusticas e de outros fenômenos luminosos, os quais dependem de programas extremamente complexos e computacionalmente intensivos.

2.3.1 Algoritmos de renderização

Ao longo da história, foram desenvolvidos inúmeros algoritmos de renderização, cada qual com suas vantagens e desvantagens em termos de efeitos que conseguem simular; qualidade da simulação; e tempo necessário para seu término. O *Path Tracing* é um desses e, como o nome indica, é baseado no traçamento de raios[9], vetores, que vão da câmera virtual à cena e seus objetos[10]. A cada intersecção do *camera ray* com um objeto da cena, traça-se vários raios em direções que variam conforme as propriedades físicas do material simulado ─ o traçamento pode, por exemplo, tanto ser aleatório, para o caso de superfícies totalmente difusas, quanto regido pela lei de Snell, para aquelas refrativas. Esses vários raios interseccionam outros objetos da cena, o que resulta, por sua vez, no lançamento de outros raios de luz, num processo que se repete sucessivamente a cada intersecção com objetos até uma fonte de luz ser encontrada (PHARR; JAKOB; HUMPHREYS, 2016, p. 870). Esse procedimento computa a luz tanto direta quanto indireta que incide num dado ponto da superfície de um objeto e é ainda muito utilizado na atualidade por *softwares* como *Blender*[11], *LuxCoreRender*[12] e *Autodesk Arnold*[13]. Isso pois seu método de funcionamento, considerado de força bruta, consegue simular uma imensa variedade de efeitos ópticos e com alta qualidade ao custo de um grande gasto computacional (MENEGHEL; NETTO, 2015, p. 35).

Apesar dessa referida qualidade e versatilidade, seu uso para cenas com múltiplas reflexões especulares ─ como é o caso daquelas com cáusticas ─ não é tão proveitoso: nessas situações os métodos probabilísticos que regem o *Path Tracing* perdem eficiência, ocasionando num imenso tempo de renderização (ZELTNER; GEORGIEV; JAKOB, 2020, p. 149). Uma outra opção é o *Light Tracing*, em que "paths are started at the light sources and, when an intersection between a ray and an object is found, a ray is generated towards the observer [a câmera] in order to hit the image plane, adding a color contribution to the corresponding pixel" (MENEGHEL; NETTO, 2015, p. 35). Por começar a série de

---

9 Trata-se essa de uma abstração muito utilizada na literatura sobre o tema. O computador, na verdade, não emite raios literais do objeto à câmera virtual e sim calcula algebricamente qual seria essa intersecção da câmera com esse raio conceitual.

10 A inversão da direção dos raios de luz não impacta no resultado final (NYE, 1999, p. 34).

11 *Blender* é um programa gratuito e *open-source* de animação e modelagem 3D. Seu principal renderizador é o *Cycles*, um renderizador *path tracer*.

12 *LuxCoreRender* é um renderizador *standalone* gratuito e que pode também ser integrado, via *plugin*, a diversos programas de modelagem 3D e animação, como o *Blender*.

13 *Autodesk Arnold* é um renderizador pago da empresa *Autodesk* muito utilizado nos efeitos especiais de grandes produções de *Hollywood* e jogos de videogame de alto orçamento.

traçamentos de raios a partir de uma fonte de luz, trata-se de um método muito bom para renderização de cáusticas e outros efeitos especulares. Ao mesmo tempo, não é muito eficiente para a maior parte das cenas, já que a probabilidade de um raio traçado sair da superfície do objeto e *de fato* atingir o *image plane* é muito baixa, obrigando a emissão de mais raios, o que aumenta consideravelmente o tempo de renderização, ao ponto de não ser vantajoso em comparação aos outros métodos para cenas que não estejam recheadas de cáusticas e efeitos similares (Ibid., p. 35).

Uma mistura desses dois métodos é feita no *Bidirectional Path Tracing*, "very useful in scenes containing hard to find light sources, such as lights inside luminaries" (MENEGHEL; NETTO, 2015, p. 35). Neste método, "paths are traced starting from lights and from the camera, and at each intersection point with objects on the scene, the method tries to connect both paths, in order to create complete paths which effectively carry light on the scene" (MENEGHEL; NETTO, 2015, p. 35). A fig. 9 mostra exatamente esse processo. Nela, as linhas amareladas representam raios iniciados a partir da luz, que juntos formam o *light path*; a vermelha ilustra os raios originários da câmera, que em conjunto compõem o *camera path*. No ponto de intersecção do raio vindo da câmera com o chão (da linha vermelha com a linha preta horizontal), o algoritmo de renderização tenta e consegue criar um caminho que liga *camera path* e *light path* – indicado pela linha pontilhada –, resultando num "complete *path*". Através de "*complete paths*" como estes, o algoritmo consegue computar efeitos difíceis de se alcançar só com *path tracing*, como cáusticas, mas o faz sem uma penalidade tão grande de performance como o ocorre no *light tracing* puro. A fig. 10 compara como *Path Tracing* e *Bidirectional Path Tracing* lidam com a renderização, em um mesmo intervalo de tempo, de uma cena desafiadora, com muita iluminação indireta, fruto do rebatimento da luz nas paredes.

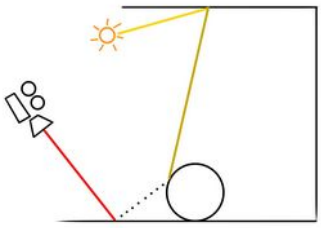

Figura 9 – Diagrama do funcionamento do *Bidirectional Path Tracing*

Fonte: o autor

Figura 10 – Comparação entre *Path Tracing* e *Bidirectional Path Tracing* realizada no *RenderMan*

Fonte: edição pelo autor de imagens do manual do *RenderMan*[14]

Apesar da versatilidade e qualidade desse método ─ que faz com que seja utilizada em muitos programas de renderização, como *LuxCoreRender* e *RenderMan*[15] ─, ele também apresenta limitações, sendo "not efficient for transport paths with specular-diffuse-specular (SDS) configurations" (GEORGIEV, et al., 2012, p. 1), o que inclui, por exemplo, cáusticas vistas através de espelhos.

Uma solução para esses casos é o *Progressive Photon Mapping*. Este é um método de duas etapas. Na primeira, raios de luz são traçados da câmera aos objetos e, na segunda, são lançados fótons das fontes de luz aos pontos de intersecção resultantes da etapa anterior. Essa segunda etapa é repetida progressivamente, com mais e mais fótons sendo lançados e acumulados nos pontos de intersecção. A densidade deles nesses pontos é então utilizada para computar a iluminação da cena (MENEGHEL; NETTO, 2015, p. 35). Trata-se de um processo eficiente para reflexões especulares, especialmente para computar cáusticas e seus rebatimentos nas superfícies, efeitos que, como visto, podem ser inviáveis com outros métodos. Na fig. 11, por exemplo, vê-se cáusticas através da reflexão em esferas espelhadas. Todavia, há um dano colateral de calcular a iluminação a partir da densidade: há perda de nitidez das áreas luminosas, algo muito negativo a depender da aplicação (PHARR; JAKOB;

14 A página do manual com as imagens originais está disponível em <https://rmanwiki.pixar.com/display/REN24/PxrVCM>. Acesso em: 6 set. 2022.

15 *RenderMan* é um renderizador pago desenvolvido pela *Pixar Animation Studios* e utilizado nos longas e curtas da empresa bem como em diversas produções audiovisuais de outros estúdios.

HUMPHREYS, 2016, p. 966). A cada nova iteração do algoritmo, a área em que se calcula a densidade dos fótons diminui, fazendo a nitidez progressivamente aumentar (fig. 11), ao custo de uma elevação significativa também do tempo de renderização (MENEGHEL; NETTO, 2015, p. 35).

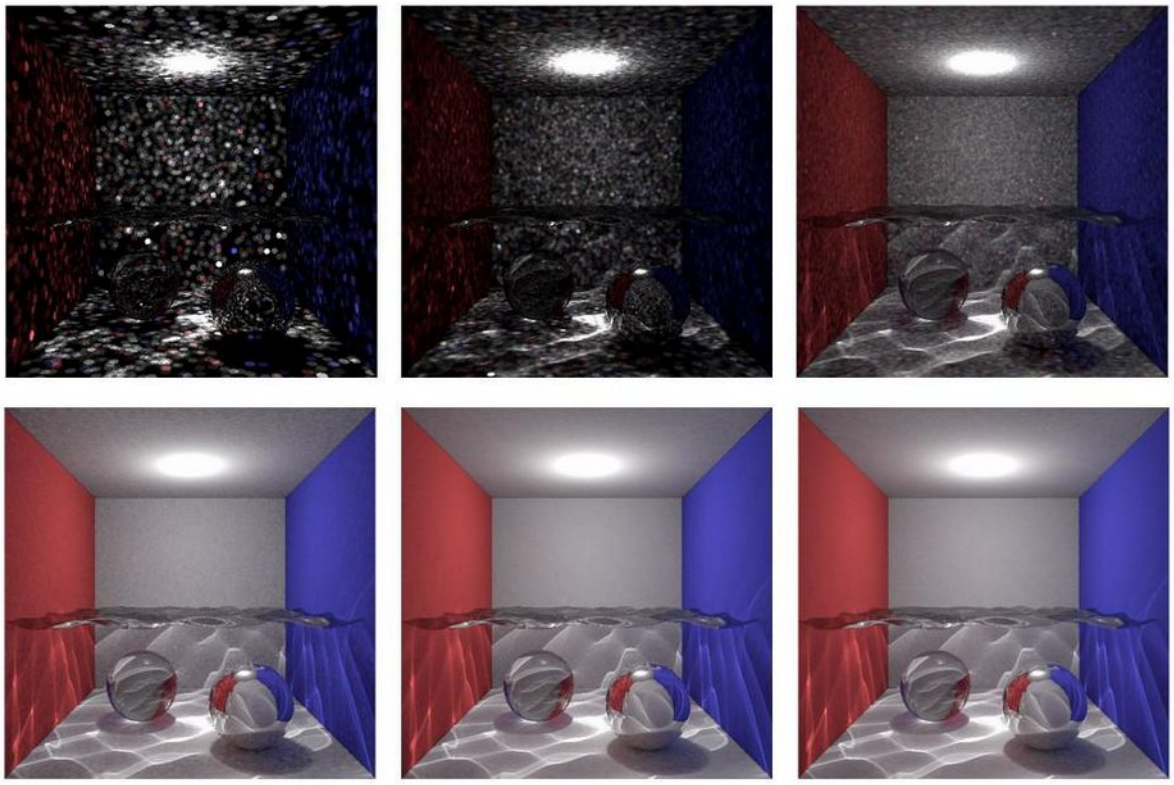

Figura 11 – Melhora, ao longo do tempo, da renderização de uma cena com o *Photon Mapping*

Fonte: renderizações por Ahmet Alperen Akcay e disponíveis em seu *blog*[16]

Para cenas com muitas reflexões – o que inclui cenas com cáusticas – esse método de renderização se mostra muito efetivo e eficiente. “However, its inefficiency under diffuse lighting and its relatively low order of convergence make progressive photon mapping impractical as a general global illumination solution” (KNAUS, Claude, 2011; ZWICKER apud GEORGIEV, *et al.*, 2012, p. 2): tornam-no inadequado para casos gerais, apesar da proficiência com alguns efeitos específicos.

Uma solução para computar diversos tipos de efeitos luminosos de forma satisfatória e eficiente seria uma mistura entre o *Bidirectional Path Tracing* e o *Photon Mapping*.

16 Disponível em <https://bilalyaylak.blogspot.com/2018/06/project-progressive-photon-mapping.html>. Acesso em 6 set. 2022.

Entretanto, essa combinação era de difícil execução “due to important differences in the mathematical frameworks used to formulate these two algorithms” (GEORGIEV, et al., 2012, p. 2): um funciona a base de densidade, outro, de caminhos traçados. Ironicamente, a solução foi introduzida de forma independente e simultânea por dois grupos diferentes de pesquisadores e constitui o *Vertex Connection and Merging* (MENEGHEL; NETTO, 2015, p. 35). O método é um dos mais avançados e consegue simular uma imensa variedade de efeitos ópticos e com enorme qualidade, a qual compensa o grande gasto computacional necessário. A fig. 12 compara os resultados, após 30 minutos de renderização, do *Bidirectional Path Tracing* (à esquerda), *Photon Mapping* (no centro) e *Vertex Connection and Merging* (à direita). Na figura, fica evidente como o primeiro método não consegue simular alguns efeitos que o segundo consegue – como as cáusticas vistas através do espelho –, mas, no geral, apresenta um resultado melhor (com menos ruído) do que ele. O *Vertex Connection and Merging*, todavia, consegue reunir as vantagens dos dois algoritmos anteriores, superando-os individualmente. Por conta dessa versatilidade e da qualidade das imagens geradas, esse método vem sendo utilizado, por exemplo, nas grandes produções cinematográficas da *Pixar Animation Studios* através de sua implementação no *RenderMan*, o renderizador proprietário da empresa.

Figura 12 – Comparação entre três algoritmos diferentes de renderização

Fonte: (GEORGIEV, *et al*., 2012)[17]

Apesar disso, o *Vertex Connection and Merging* apresenta ainda limitações como os outros métodos: “it does not perform better [em comparação a eles] on transport paths that are poorly handled by both BPT [*Bidirectional Path Tracing*] and PM [*Photon Mapping*]. Such paths are, for example, caustics falling on a highly glossy surface” (GEORGIEV, *et al.*, 2012, p. 8).

17 As imagens também estão disponíveis em <https://cgg.mff.cuni.cz/~jaroslav/papers/2012-vcm/>. Acesso em 6 set. 2022.

Para diferentes cenas com distintas finalidades e efeitos ópticos requisitados, variados algoritmos de renderização podem ser os mais adequados. Não necessariamente a versatilidade e qualidade do *Vertex Connection and Merging* será o mais vantajoso para *todas* as renderizações. O *Light Tracing*, pouco eficiente para boa parte das cenas por conta da maneira como funciona, justamente por essa, supera os métodos mais recomendados para a renderização de cáusticas – *Vertex Connection and Merging* e *Bidirectional Path Tracing* – na simulação de cenas mais simples com o fenômeno luminoso, como a da visão do fundo de uma piscina e suas *caustic networks* num dia ensolarado (MENEGHEL; NETTO, 2015, p. 39).

Cáusticas são um fenômeno complexo, mas que pode ser simulado com bastante qualidade, acurácia e, se forem usados renderizadores adequados, de forma relativamente eficiente, embora ainda seja necessário grande tempo de renderização e poder de processamento. Contudo, há detalhes que geralmente não são simulados por serem muito sutis, como é o caso de *diffraction patterns*. A simulação do fenômeno físico deixa de fora muitos elementos a fim de economizar gastos computacionais, especialmente aqueles cuja falta não impacta muito na cena simulada e não diminui significativamente a plausibilidade da simulação. “In essence, rather than synthesize full physical reality, we may be able to strive for perceptual plausibility” (REINHARD, *et al.*, 2013, p. 2000); e é justamente isso que buscam os algoritmos de renderização artísticos – que não precisam ter um compromisso pleno com a acurácia física.

2.2 Análises

Cáusticas são focalizações de luz, focalizações muito concentradas que geram cruzamento de raios de luz. Esses raios partem de locais *diferentes* do objeto emissor de luz ─ sendo esse uma lâmpada, o Sol ou até mesmo a Lua, a qual, apesar de não produzir luz própria, reflete aquela vinda do Sol, colocando luz no sistema. Além disso, esses raios passaram por locais *diferentes* da superfície refratora ou reflexiva, mas foram reunidos por essa num *mesmo* ponto ao serem projetados numa outra superfície. Uma interpretação artística da cáustica é a de que cada ponto que a compõe não é apenas uma concentração de luz, mas uma aproximação de espaços e partes distintas de objetos. Os variados e complexos formatos desse fenômeno óptico são, todos, maneiras de distribuir e organizar luz, assim como espaço e partes dos objetos. Trata-se de uma organização que só pode ser observada,

exceto em casos muito específicos, quando projetada em uma outra superfície; e quando isso é feito, liga também emissor, refrator/refletor e superfície que recebe os raios.

Além dessa relação com o espaço, a cáustica apresenta uma grande tridimensionalidade, que se mostra de muitas formas. A começar, as *wavefronts*, as ondas de luz que geram a cáustica, podem ser entendidas como superfícies tridimensionais que se propagam pelo espaço, modificando-se enquanto caminham por ele.

Olhando agora para a projeção do fenômeno óptico numa superfície, percebe-se uma ilusão de tridimensionalidade gerada pela variação de intensidade luminosa nas imediações da cáustica projetada. Com isso, essa última aparenta dobrar-se sobre si mesma e se interseccionar. Suas variações de claro e escuro também criam a impressão de um relevo luminoso. Pensando agora em *caustic networks*, a sobreposição de diferentes cáusticas gera uma noção forte de profundidade, passando a impressão de camadas translúcidas empilhadas. As cáusticas continuam sendo projeções planificadas em superfícies, mas a percepção humana as entende como complexas formas vividamente tridimensionais.

Há ainda uma outra maneira como essa projeção planificada pode ser transformada em 3D. A cáustica é uma singularidade, uma catástrofe, podendo ser pensada como as dobras planificadas de uma superfície. Fazendo o processo inverso, consegue-se uma *superfície a partir das singularidades*. Esse procedimento é similar a encontrar as *wavefronts* a partir da cáustica projetada num anteparo paralelo a elas, mas diferente desse, a superfície construída a partir da cáustica não precisa ser uma frente de onda e, portanto, perpendicular à direção dos raios de luz: pode ser uma forma imaginária. Não se trata da representação de um fenômeno físico, e sim de uma tradução *voluntária* da cáustica planificada em uma forma 3D.

Um procedimento análogo e menos abstrato seria esculpir a partir de um desenho de modelo vivo, afinal, os contornos desse são “nothing more than a *catastrophe map*, showing the location of the fold catastrophes” (MCROBIE, 2017, p. 7) (grifo do autor), nada mais do que dobras do corpo do modelo sendo vistas de um determinado ângulo e planificadas no papel ─ e também na retina do desenhista. McRobie (2017) explica como não apenas as *folds* mas as demais três primeiras catástrofes podem aparecer nesse processo de desenho do corpo. Entendendo as cáusticas dessa mesma forma, como desenhos, seria possível realizar uma escultura a partir delas. Com esse processo, a geometria resultante provavelmente seria diferente daquela sugerida pelas variações de intensidade; e essas duas formas de criar

tridimensionalidade – a partir da variação da luminosidade ou das catástrofes que compõem o desenho das cáusticas – são diferentes das *wavefronts* em si e da geometria real da cáustica no espaço tridimensional.

Essa última pode ser de difícil visualização, “one can try to produce a genuine view of the three-dimensional caustic by forming it in smoke, but the method has not proved very effective” (NYE, 1999, p. 57). Uma outra forma seria ‘fatiar’ a cáustica, colocando anteparos paralelos às *wavefronts* em diferentes alturas dela. Somando todas as fatias, seria possível aproximar a forma 3D da propagação da cáustica no espaço. Essas fatias mostram a evolução da projeção da cáustica ao longo da distância relativa ao objeto que a gerou, então além de, juntas, mostrarem a forma 3D da cáustica, separadas, cada uma mostra um estágio do fenômeno óptico. Esse estágio pode ser transformado em uma forma tridimensional por si só, seja pela visão humana, num processo de ilusão de ótica, ou pelo esforço ativo, em esculpir a partir de catástrofes. Nesse sentido, o fatiamento não só geraria uma forma tridimensional, mas uma quadrimensional, mostrando a evolução de diversas formas 3D imaginárias, suscitadas pela cáustica, evoluindo ao longo do eixo da distância entre refrator e anteparo. É importante destacar que, diferente das três dimensões reais das cáusticas, essa quarta dimensão não é contínua. Devido a como foram criadas, essas formas 3D imaginárias que compõem essa dimensão – geradas a partir de cada uma das fatias – resultam numa superfície cheia de buracos e descontinuidades quando unidas.

Em resumo, além dessa dimensão descontínua, existem quatro tipos diferentes de tridimensionalidade possíveis associadas às cáusticas: duas que fazem parte do fenômeno físico – a forma 3D real de sua propagação no espaço e as suas *wavefronts*; uma que faz parte da percepção visual do fenômeno – a ilusão de tridimensionalidade gerada pela luminosidade; e outra que tem relação com a matemática por trás do fenômeno luminoso em si, mas precisa de esforço ativo para ser gerada. Essa é aquela em que se enxerga a cáustica como um desenho do qual se deseja a escultura, como uma catástrofe da qual se busca o desdobramento.

Cáusticas são abordadas por alguns artistas, às vezes justamente por conta da tridimensionalidade que evocam, mas essa se limita majoritariamente apenas a um de seus quatro tipos possíveis: o da ilusão gerada pelo contraste entre claro e escuro. Os quatro tipos de tridimensionalidade fornecem possibilidades únicas aos artistas e sua mistura – como a do

exemplo da quadrimensionalidade – também pode ser abordada. As cáusticas são um material valioso a ser abordado nas artes, tanto por seus elementos visuais quanto conceituais.

2.4.1 Naum Gabo

Há uma infinidade de artistas que trabalham com a luz ou exploram alguns de seus efeitos, dentre eles Naum Gabo. De origem russa, Naum Pevsner ─ que depois viria a ser conhecido como Naum Gabo para se diferenciar de seu irmão Antoine Pevsner ─ foi um escultor e artista plástico muito influente. Seu interesse por física, engenharia, química e matemática – disciplinas que posteriormente estudou academicamente – tiveram um impacto significativo em sua obra (OLSON; CHANIN, 1948, pp. 15-17).

Provavelmente ligado a esse interesse, Gabo deu atenção às formas das cáusticas, registrando uma delas em *Photograph of Reflected Light Pattern*, 1941 (Fig. 13). Na imagem, essas formas luminosas são claras e evidentes, com "the bright V shape center left being a rather dramatic hyperbolic umbilic [uma das catástrofes elementares], connected to many clear folds and cusps to its right" (MCROBIE, 2017, p. 110). A complexidade delas, porém, não se restringiu à bidimensionalidade capturada, sendo, no mesmo ano, transformada na icônica escultura de *Perspex* e celulose *Spiral Theme* (Fig. 14) (Fig. 15). Vista paralela a sua base (Fig. 15), talvez seja difícil perceber a inspiração da obra, ainda mais pela transparência do material, que torna ainda mais complicado discernir sua geometria intrincada. Entretanto, um olhar de cima (Fig. 14) torna tudo mais nítido, sendo possível ver as *cusps* e outras catástrofes da fotografia.

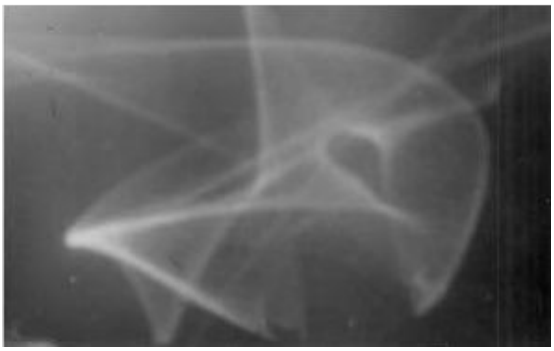

Figura 13 – *Photograph of Reflected Light Pattern*, 1941.

Fonte: página da obra no site da Tate[18]

18 https://www.tate-images.com/M03053-Experimental-photograph-of-reflected-light-pattern.html. Acesso em: 6 set. 2022.

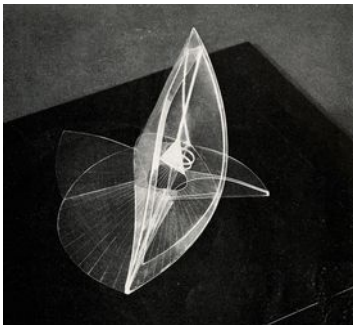

Figura 14 – *Spiral Theme*, 1941.

Fonte: https://thecharnelhouse.org/2015/02/22/naum-gabo-and-antoine-pevsner/naum-gabo-spiral-theme-1941-plastic-24-high/

Figura 15 – *Spiral Theme*, 1941.

Fonte: página da obra no site da Tate[19]

As bordas das placas, com aspecto menos translúcido, correspondem às singularidades brilhantes que compõem a cáustica, enquanto as partes centrais são as formas luminosas que rodeiam as singularidades. Se na foto as variações de intensidade da cáustica aparentam ser folhas distorcidas que passam umas sobre as outras e eventualmente se interseccionam, na escultura elas de fato o são. A diferença só está no material: num caso, luz, no outro, acrílico transparente, o qual, apesar da falta de brilho próprio, captura bem as propriedades da luz. Sua transparência permite enxergar o suporte preto e o ambiente ao redor, mimetizando a capacidade da luz de, na maior parte dos casos, não ofuscar completamente a superfície em que incide. Quando se vê esses elementos através de não uma, mas várias das "folhas" de *Perspex* do trabalho, a transparência diminuída também faz jus à capacidade que um brilho tem de somar-se a outro, aumentando de intensidade.

19 https://www.tate.org.uk/art/artworks/gabo-spiral-theme-t00190. Acesso em: 6 set. 2022.

O uso que Gabo faz das propriedades do *Perspex* nutre forte relação com o primeiro axioma do Manifesto Realístico – texto feito por ele em parceria com seu irmão Antoine Pevsner:

> "[…] in painting we renounce colour as a pictorial element. colour is the idealized optical surface of objects; an exterior and superficial impression of them; colour is accidental and it has nothing in common with the innermost essence of a thing. We affirm that the tone of a substance, i.e. its light-absorbing material body is its only pictorial reality" (GABO; PEVSNER, 1920, apud. HARRISON, et al., 1992, pp. 298-299) (grifo do autor)

Spiral Theme não é uma pintura, mas as propriedades de transparência do material utilizado nela, sua "pictorial reality", conseguem capturar a essência luminosa da luz, indo além de sua mera aparência superficial, aprofundando-se em suas propriedades físicas. Similarmente, a renúncia do entendimento do espaço como volume em prol de um como profundidade, terceiro axioma do manifesto, é a exata mentalidade por trás da transformação que o artista faz de luminosidade em profundidade, de ilusão de tridimensionalidade proporcionada por uma cáustica em tridimensionalidade real.

Essa busca pela verdade física ou matemática por trás da natureza é um elemento importante das obras de Gabo e de outros construtivistas (READ, 1948, p. 11) e está presente em outros trabalhos. Mesmo não abordando cáusticas direta ou intencionalmente, a série de esculturas *Linear Construction No. 2*, 1970-1971, captura muito bem a mesma natureza geométrica que rege esse fenômeno óptico. Na série, inúmeros fios de *nylon* tensionados, presos nas extremidades da estrutura externa de plástico, formam envelopes, curvas geradas por retas. Essas possuem os mesmos formatos característicos das catástrofes elementares ─ como pode ser visto claramente nas *cusps* da fig. 16. "Gabo really has noticed the cusps [e outras catástrofes], and he finds them interesting. Although he may not have had a name for them, he places them knowingly central in most of his major works" (MCROBIE, 2017, p. 109) e explora suas propriedades geométricas a fundo, como essa série exemplifica. É curioso como essa exploração artística tenha acontecido de forma simultânea à pesquisa de René Thom, apesar deles nunca terem se encontrado (MCROBIE, 2017, p. 111).

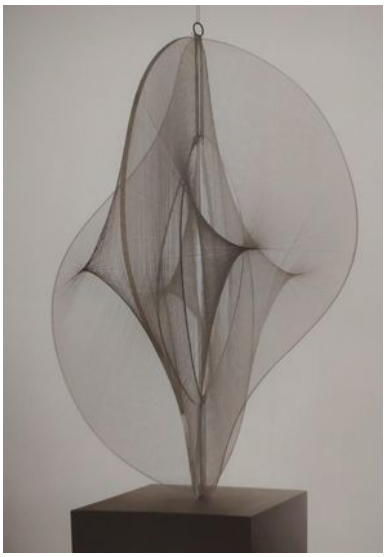

Figura 16 – *Linear Construction No. 2*, 1971

Fonte: (MCROBIE, 2017, p. 111)

Com isso, mesmo não se baseando em cáusticas, as múltiplas iterações de *Linear Construction No. 2*, nutrem uma relação forte com esse fenômeno óptico. Não apenas há catástrofes em ambas, mas tanto numa quanto na outra essas formas curvas são fruto da soma de retas ─ linhas no trabalho de Gabo, raios de luz nas cáusticas.

Apesar de

> "the intellectual vision of the artist is derived from modern physics, the creative construction which the artist then presents to the world is not scientific, but poetic. It is the poetry of space, the poetry of time, of universal harmony, of physical unity. Art — it is its main function — accepts this universal manifold which science investigates and reveals, and reduces it to the concreteness of a plastic symbol" (READ, 1948, p. 11).

2.4.2 Olafur Eliasson

Olafur Eliasson é outro artista que aborda cáusticas, mas seu foco está menos na física e matemática do fenômeno e mais no seu uso humano, seu significado social e em sua relação com a percepção. Abertamente inspirado por trabalhos de artistas do início do século XX, o artista dinamarco-islandês fez uso das cáusticas em alguns de seus trabalhos recentes, justamente interessado em como os contrastes luminosos dessas distorcem a percepção do espaço. "The viewer, despite knowing that the shapes she is watching emerge are only light projections, sees space and three-dimensional forms where there are none" (Your ocular relief, 2021).

Your ocular relief, 2021, é um desses trabalhos (Fig. 17). Nessa obra cinética, projetores de LED emitem luz sobre um conjunto de lentes em constante movimento, resultando em cáusticas refrativas projetadas numa tela curvada no espaço escuro da galeria. Essa escuridão permite uma visualização com clareza das cores e formas variadas das cáusticas, além de gerar um 'apagamento' da geometria preexistente da tela curvada. Não olhando para os reflexos no chão, que entregam o caráter de projeção numa superfície, as cáusticas parecem flutuar no espaço e sua tridimensionalidade aparente é intensificada. Mostram-se como folhas de luz dobradas sobre si mesmas e sobrepostas umas sobre as outras, com a distinção entre as diferentes camadas de folhas – as diferentes cáusticas – ainda sendo possível pela diferença de cor. Essas formas luminosas não são estáticas: mudam constante e lentamente conforme as lentes que as geram são rotacionadas e transladadas. "The resulting composition [das projeções movendo-se] makes visible the physical phenomenon of light bending and splitting" (Ibid., 2021): evidenciam o movimento e a metamorfose das cáusticas, que não é apenas mero deslocamento no espaço, mas uma transformação radical de formato. O intrincamento das formas e as mutações sofridas fazem com que "although the sequence repeats in a continuous loop, [...] "it [o trabalho] appear[s] always new, beyond simple comprehension" (Ibid., 2021).

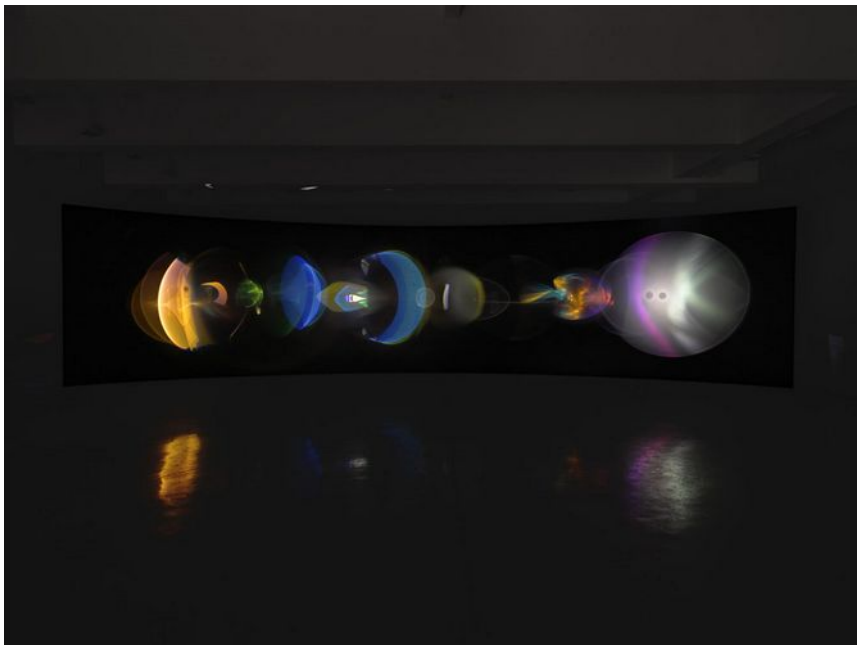

Figura 17 – Your ocular relief, 2021
Fonte: página da obra no site do artista[20]

20 https://olafureliasson.net/archive/artwork/WEK110960/your-ocular-relief#slideshow. Acesso em: 6 set. 2022.

A transmutação constante faz com que os brilhos ganhem um caráter orgânico, apesar da grande regularidade e simetria que dispõem na maior parte dos casos. Essas formas extremamente regulares e que remetem ao próprio formato das lentes que as geram são, em sua maioria, diferentes das sete catástrofes elementares que se costuma ver em cáusticas, o que faz sentido, uma vez que as da obra foram geradas não por refratores genéricos e sim por aparatos ópticos simétricos, verdadeiras lentes. "If you add symmetry you can start to encounter catastrophes that would otherwise be more rare" (MCROBIE, 2017, p. 77). Provavelmente também relacionado às lentes e a sua capacidade de facilmente perder foco, algumas cáusticas são menos nítidas, tendo uma aparência desfocada. Isso contribui para o aspecto orgânico da obra e adiciona texturas que ajudam a tornar a composição mais interessante.

Olafur não usa o termo cáusticas para se referir às formas luminosas desse e demais trabalhos: chama-as de "*lens flare*". Essas "*lens flare*" podem ser entendidas como metonímia para *lens aberrations* ─ o subtipo de cáusticas com as quais trabalha. Esse subtipo é produto de uma *falha* das lentes, uma perturbação no foco delas que dificulta ou impossibilita a formação da imagem. Esse caráter de falha lenticular é importante para as obras desse artista, especialmente para essa. Dispor as lentes de tal forma que sempre gerarão seus resíduos, e não imagens nítidas das coisas, liberta-as de sua função vigilante. "We progress beyond the single-gaze of the panopticon to the decentralization of the authority of the lens" (GALERIA TANYA BONAKDAR, 2021), mostrando a face bela e sublime dos aparatos ópticos, um alívio de seu caráter inquisidor. Esse é o "*ocular relief*" presente no título do trabalho.

Olhar essa obra como cáusticas, e não como apenas distorções lenticulares, adiciona mais uma camada de significado a esse alívio que propõe. O foco deixa de ser aquele ponto infinitesimal, aquele tipo de cáustica que reúne todos os raios de luz num único lugar – e justamente essa centralização que possibilita a vigilância[21] –, e passa a apresentar os mais diversos formatos. Os raios não mais precisam se reunir num centro, podem se encontrar em pequenos grupos (cuja quantidade de raios é definida pela *multiplicity*) que criam curvas contínuas das mais diversas conformações e que são planificadas nas paredes em que são projetadas. Gera-se, então, uma imensa pluralidade de cáusticas, uma imensa variedade de formas diferentes – e mutáveis, no caso da obra cinética de Olafur – de *distribuir* a luz numa

21 Vale lembrar que o panóptico original, criado por Jeremy Bentham em 1785, era uma penitenciária circular com uma torre de vigilância central, da qual era possível observar todos os detentos.

superfície – ou no espaço, afinal, as cáusticas são focalizações de luz no espaço, embora geralmente só sejam vistas quando projetadas numa superfície plana.

A intenção libertadora das lentes está presente também, embora de forma mais discreta, em *Not-yet-conceived flare from a nearby, more-than-human future* (Figs. 18 e 20), também de 2021. A obra cinética constitui-se de um dispositivo de projeção em formato circular, composto por lentes e dois anéis concêntricos de *colour-effect filter glass*[22] dispostos de forma perpendicular um ao outro e que giram num passo lento e contínuo (Not-yet-conceived flare from a nearby, more-than-human future, 2021). Esse aparelho projeta cáusticas ─ ou *flares* como nomeia ─ na parede de uma sala escura. Diferente da obra anterior, com suas cáusticas majoritariamente nítidas, nessa elas são extremamente suaves. A razão disso provavelmente é o desfoque gerado pela principal lente do aparelho projetor, somado à grande dimensão da fonte de luz dele, a qual causa "a superposition of many non-coherent parallel beams [...] [que] blurs the caustic" (NYE, 1999, p. 29). O resultado mais notável desse desfoque é a perda de definição das singularidades brilhantes, tão características das cáusticas. Perceptualmente, isso é entendido como uma suavização das dobras das folhas de luz que aparentam compor o referido fenômeno luminoso. Na obra em questão, o desfoque é tamanho que a própria noção de folhas é perdida, sobrando no lugar uma impressão mais vaga de tridimensionalidade: a cáustica aparenta ser um relevo luminoso mais suave. A diminuição de nitidez dela está associada a uma atenuação no contraste que há entre suas singularidades, normalmente extremamente brilhantes, e as áreas substancialmente mais escuras que as rodeiam. Quanto maior o desfoque, mais a distribuição de luz torna-se homogênea, e o que antes era para percepção um relevo suave, mas ainda montanhoso, torna-se pura suavidade, meras colinas e morros.

Apesar disso, essa suavidade não faz diferentes cáusticas virarem uma única massa indiscernível, já que suas cores, modificadas pelos *colour-effect filter glass*, explicitam suas distinções, apesar dos matizes eventualmente se misturarem. Comparando uma foto do trabalho de Olafur (Fig. 18) com uma versão digitalmente dessaturada da mesma imagem (Fig. 19) isso fica evidente. Um pouco acima do centro da primeira, por exemplo, há uma faixa curvada para a esquerda de luz azul que ganha destaque em contraste com os amarelos ao redor, contudo, essa mesma cáustica não pode sequer ser identificada na versão em preto e branco.

---

22 Vidros com um *coating* (uma camada de algum composto especial) que faz com que a luz que lhes atravessa mude de cor conforme o ângulo de incidência.

Figura 18 – Fotografia de *Not-yet-conceived flare from a nearby, more-than-human future*, 2021.

Fonte: página da obra no site do artista[23]

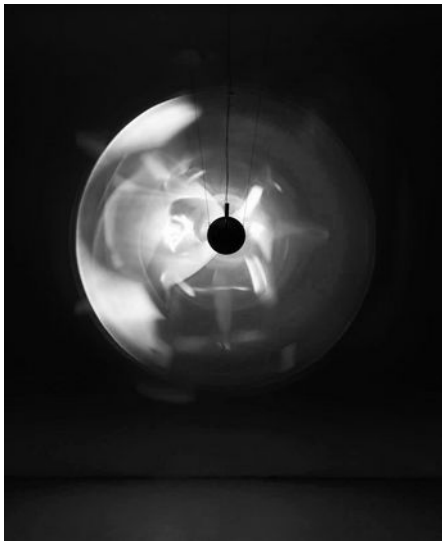

Figura 19 – Mesma fotografia da figura anterior, mas com as cores removidas digitalmente.

Fonte: o autor, baseado na figura anterior

O resultado gerado por essa soma de desfoque e cor é um portal circular que aparenta ser feito de formas etéreas, ora gasosas, ora líquidas (Fig. 20). As metamorfoses complexas das cáusticas ficam ainda mais misteriosas com a soma desses efeitos: viram uma dança não apenas de formas, mas de texturas e cores. Essas sobrepõem-se em camadas mais ou menos translúcidas que habitam os limites circulares (ora nítidos, ora mais nebulosos) da projeção. Essa, apesar da diminuição da noção de tridimensionalidade, aparenta não apenas ser circular, mas abaulada, como as lentes esféricas que as geram. Isso provavelmente é causado pela

23 https://olafureliasson.net/archive/artwork/WEK110987/not-yet-conceived-flare-from-a-nearby-more-than-human-future#slideshow. Acesso em: 6 set. 2022.

lente final do aparato luminoso – responsável pelas cáusticas e por parte do desfoque ─, a qual concentra um pouco de luz nas bordas. Num ambiente escuro, a projeção parece realmente um portal tridimensional de formato análogo ao da lente que a gera.

Figura 20 – Fotografia de *Not-yet-conceived flare from a nearby, more-than-human future*, 2021.

Fonte: página da obra no site do artista

2.4.3 Alan Jaras

O artista britânico Alan Jaras, que já atendeu pelo nome de Reciprocity nas redes sociais, faz inúmeros experimentos com cáusticas, os quais compartilha em seu site[24] e perfil do *Flickr*[25].

Microscopista de formação, Jaras tem grande domínio com ferramentas ópticas e está acostumado a utilizá-las junto com a luz para melhor entender as propriedades dos materiais e objetos estudados. No seu trabalho, que se inicia em 2006, Jaras inverte esse processo e utiliza de *objetos* para estudar a *luz em si* e como ela é refratada por eles na forma de cáusticas.

Para registrá-las, o artista faz uso de uma câmera analógica, mas “this is 'lensless' photography - here the object itself becomes the lens” (JARAS, *s.d.*a). Enquanto a óptica

24 https://www.alanjaras.com/. Acesso em: 11 ago. 2022.

25 *Flickr* é uma rede social baseada no compartilhamento de fotos e vídeos.

busca incessantemente a produção de lentes mais precisas, que gerem um foco mais próximo de um ponto perfeito e resultem em imagens mais nítidas, Jaras busca o contrário: deseja as distribuições de luz mais variadas e distantes do ponto. Para isso, utiliza como lente objetos assimétricos, distorcidos e não necessariamente completamente translúcidos ou com as refrações mais nítidas. O resultado é uma imensa variedade de cáusticas. Não apenas seus formatos são diversos, mas também a maneira como se sobrepõem e se misturam em *caustic networks*. Essa diversidade infinita afeta também as texturas e a nitidez das cáusticas, que variam entre singularidades agudíssimas e formas suaves e ofuscadas, como fica evidente em *Refractograph: S238-E* (fig. 21), em que essa diversidade de texturas contrastantes cria a impressão de movimento nessa que é uma imagem parada.

Figura 21 – *Refractograph: S238-E*, 2014.

Fonte: página da obra no *Flickr*[26]

O artista refere-se ao processo de geração da cáustica como uma jornada complexa da luz pelos vidros e plásticos de formas intrincadas que utiliza (JARAS, *s.d.*b). As cáusticas geradas são, nesse contexto, registro planificado e relato da trajetória que a luz faz pelas várias superfícies com as quais interage. Nessa jornada, formato, textura e até cor dos objetos

26 Disponível em <https://www.flickr.com/photos/alanjaras/14149844668/>. Acesso em: 6 set. 2022.

refrativos influenciam nas cáusticas resultantes. Elas ‘pegam emprestado’ características dos objetos que encontram pelo caminho, muitos dos quais, objetos do dia-a-dia. Ainda assim, a relação não fica totalmente clara: não é possível adivinhar com exatidão muitas das características das superfícies refratoras a partir somente do final da jornada, das cáusticas, das imagens.

Na verdade, mesmo conhecendo o objeto refrator e algumas de suas características, a maneira *como* o artista os usou permanece um mistério. Na legenda de *Escape* (Bending Light #53) (fig. 22), Jaras afirma que uma tigela de vidro é a fonte do fenômeno luminoso. Mas há uma infinidade de cáusticas que podem ser geradas com o mesmo objeto apenas mudando levemente sua direção e posição em relação aos raios de luz ou ao filme fotográfico. Mesmo com uma réplica da tigela colocada diante da mesma luz, do mesmo filme e da mesma forma que Jaras fez, talvez a cáustica gerada fosse ligeiramente diferente, uma vez que nos trabalhos do artista, por conta da escala diminuta do filme 35 mm que usa, não importa só a forma ‘macroscópica’ das superfícies refrativas, mas suas micro imperfeições e heterogeneidades nos índices de refração. Tais detalhes são tão mínimos – e geralmente causados por minúsculos erros aleatórios e inevitáveis de produção e por acúmulo de sujeira e de deformações ao longo do tempo – que se tornam improváveis de serem iguais em duas peças. No fim, acabam funcionando como uma impressão digital refrativa, que diferencia e singulariza, embora de forma sutil, os vários objetos de uma produção massificada. Na escala trabalhada, os mínimos detalhes – como esse – transformam-se em variações perceptíveis de formato e textura.

Figura 22 – *Escape* (*Bending Light* #53), 2006.

Fonte: página da obra no Flicker[27]

Jaras manipula as luzes, a posição do objeto refrativo sobre a câmera, as configurações dessa e as próprias imperfeições do objeto para gerar as cáusticas que deseja na composição almejada dentro do filme colorido. Sua trajetória ao longo de dez anos de trabalho foi de uma intensa busca por controle desse fenômeno óptico tão elusivo. Sua série *Bending Light*, iniciada em 2006, foi o primeiro passo da sua experimentação com cáusticas. Nela, enfrentou problemas como a capacidade limitada do filme de capturar as enormes diferenças de claro e escuro que são características das cáusticas. Apesar de não conseguir solucionar por completo esse problema, aprendeu a remediá-lo com um fundo escuro e uma escolha cuidadosa de quais cáusticas garantir que fiquem no nível de claridade adequado.

Uma outra escolha que o artista precisa fazer é entre as cores – tão marcantes em suas imagens – e a nitidez das cáusticas. Os filtros coloridos – que cautelosamente coloca sobre as superfícies refrativas para colorir as cáusticas, às vezes individualmente – têm o efeito colateral de desfocar as singularidades do fenômeno óptico. Diante desse dilema, a opção do artista é quase sempre pela incorporação da falta de nitidez como elemento constitutivo de suas fotografias, como mostra um dos experimentos da série *Bending Light*.

27 Disponível em <https://www.flickr.com/photos/alanjaras/189234220/in/album-72057594061844447/>. Acesso em: 11 ago. 2022.

Em *An Assemblage of Light* (*Bending Light #73*) (fig. 23), a passagem da luz por uma placa de vidro temperado gera padrões intrincados que se aglomeram em estruturas complexas – geralmente multicoloridas – como as que podem ser vistas no canto inferior esquerdo da imagem. Essas dialogam com as formas do canto superior central, que apresentam também uma distribuição aglomerada, mas que, dessa vez, é composta por padrões que se repetem, embora com modificações significativas. A falta de nitidez nubla seus detalhes, mas, exatamente por isso, auxilia a evidenciar a diferença significativa no formato geral que as formas repetidas possuem entre si.

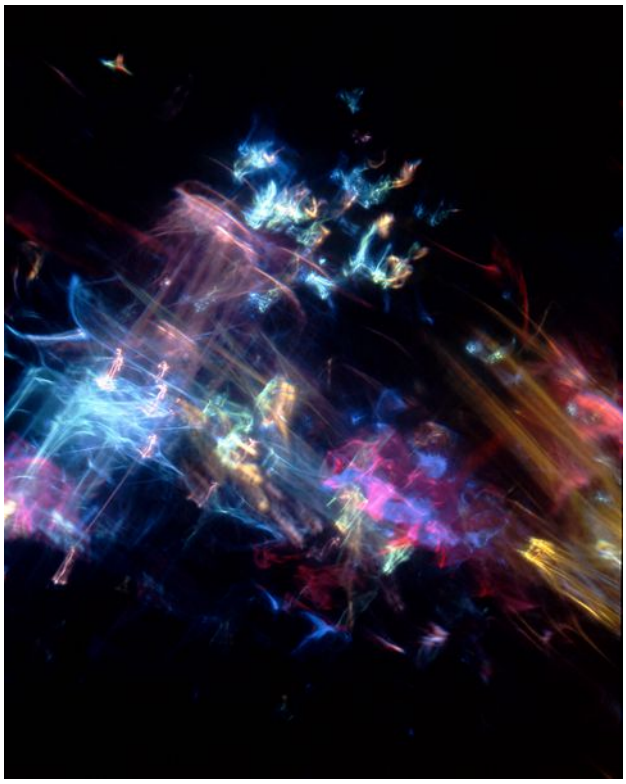

Figura 23 – *An Assemblage of Light*, 2008, de Alan Jaras

Fonte: página da obra no *Flickr*[28]

Outro efeito da perda de definição está nas massas luminosas coloridas laranja, rosa e vermelho, que se estendem, ligando os diferentes aglomerados, misturando-se a eles e auxiliando na composição. A menor claridade dessas massas somada à baixa nitidez confere-lhes a aparência de um véu translúcido que facilita a mescla de cores, enquanto as linhas e formas alongadas que apresentam – provavelmente devido a serem cáusticas projetadas de forma quase paralela à superfície do filme – geram uma impressão de movimento. A alta

28 Disponível em <https://www.flickr.com/photos/alanjaras/2546981943/in/album-72057594061844447/>. Acesso em: 6 set. 2022.

direcionalidade dessa impressão conduz o olhar e gera, no caso da massa rosa, uma leve impressão tridimensional, como se ela estivesse inclinada para cima. Isso soma-se ao fundo preto e às variações de intensidade das diferentes cáusticas e constrói na imagem distintos planos que se arranjam numa topografia sutil. Diferente de em *Ocular Relief* de Olafur, a impressão tridimensional das cáusticas, nessa e em algumas outras obras do artista inglês, está mais relacionada à sobreposição e justaposição de diferentes cáusticas com distintas intensidades, cores, graus de nitidez, e formatos do que pela ilusão de tridimensionalidade da cáustica em si.

Jaras tenta modificar e utilizar todos os elementos que têm à disposição para gerar os efeitos desejados. Em busca de ampliar esse seu controle, o artista tem passado a moldar os próprios plásticos. "By careful control and manipulation of the forming process [dos plásticos] semi-regular patterns and delicate tracery can be achieved. Also the integration of liquid colours into the soft plastic modifies the way the plastic hardens and hence the associated refraction patterns." (JARAS, *s.d.*a), além, é claro, de interferir nas cores.

Um exemplo do grande controle que a criação do objeto gerador de cáusticas permite é *Spicules of Light* (Fig. 24), vigésimo trabalho de sua série *Twisting Light*. Nele, o artista moldou e manipulou o plástico a fim de gerar estruturas pontiagudas – feitas principalmente de *cusps* e *folds* – que lembram uma figura orgânica microscópica, mas feita de luz.

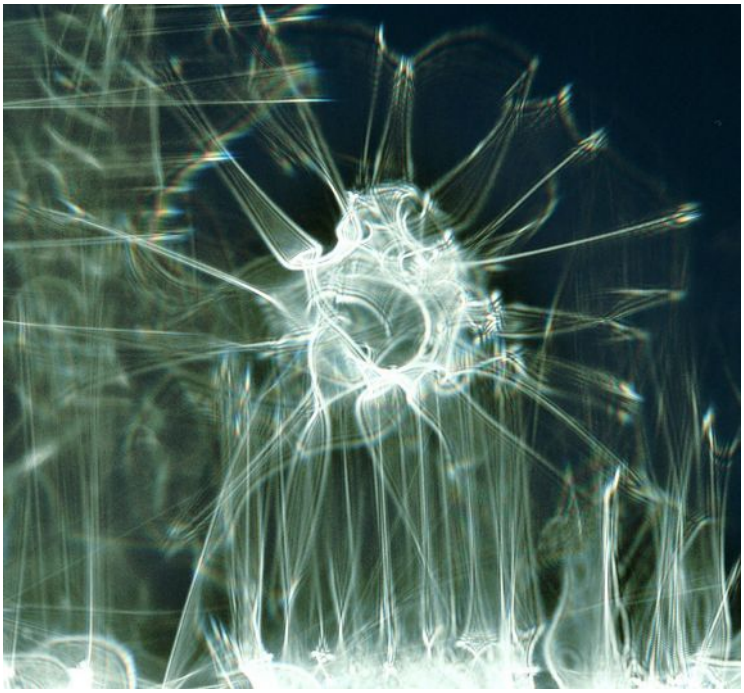

Figura 24 – *Spicules of Light*, 2006, de Alan Jaras

Fonte: página da obra no *Flickr*[29]

Jaras optou pela ausência de cores, o que permitiu maior nitidez aos formatos afiados, deu destaque à difração – as manchas coloridas que contornam as formas – e possibilitou enxergar com maior facilidade os *diffraction patterns* das cáusticas – os pontilhados e contornos que povoam as singularidades brilhantes delas. Essas estruturas difrativas estão profundamente relacionadas à natureza das cáusticas, sendo parte de sua estrutura elementar. Contudo, na maior parte dos casos, como nas obras de Olafur, por exemplo, as cáusticas são muito grandes e esses padrões não ficam muito evidentes. É justamente por Jaras capturar a pequenez das cáusticas com um filme 35 mm que esses padrões ficam à mostra, fazendo parte significativa da composição de suas obras. Nesta em específico, o papel dos *diffractions patterns* torna-se ainda maior, já que a imagem é recortada, correspondendo a uma área menor ainda do filme colorido. Esses padrões de difração criam contornos nas formas pontiagudas, conferindo-lhes maior leveza e um caráter tubular que as aproxima de espículas, o esqueleto mineral de esponjas: daí o nome da obra.

Devido à escala, mesmo quando esses padrões de difração não são um elemento composicional tão crucial, eles estão presentes, criando descontinuidades, diminuindo a nitidez e gerando um aspecto sujo. O artista não pode evitar a ocorrência desses efeitos e nem pretende, pelo contrário: abraça esse elemento da natureza das cáusticas como parte integral das suas obras. A consequência disso são cáusticas de um aspecto muito diferente daquelas mais cristalinas – ou ao menos contínuas – que se vê no dia a dia, nas obras de Olafur ou até nas cáusticas renderizadas em 3D.

2.4.4 Estúdio Media.Work

As capacidades das cáusticas exclusivamente virtuais também são muito grandes, e podem fornecer ideias para obras que trabalhem com essa referida interação híbrida. Essas cáusticas virtuais e suas possibilidades são exploradas a fundo pelo estúdio Media.Work. O coletivo independente, formado por designers, artistas, técnicos e programadores, define-se como “a team that creates cross-disciplinary experimental projects and rethinks standards and patterns of design on a global scale” (in https://media.work/studio, acessado em 11 jan. 2022). Seus projetos não se limitam apenas a trabalhos comissionados, incluindo também

29 https://www.flickr.com/photos/alanjaras/290362825/in/album-72057594139866667/. Acesso em: 6 set. 2022.

pesquisas internas, que envolvem a exploração, entre outras coisas, de materiais simulados e as possibilidades plásticas, visuais e conceituais que oferecem. Uma dessas pesquisas é *Light Transformations*, de 2021, formada por diversos experimentos com luz e cáusticas na forma de animações curtas, compilados num único vídeo de um pouco mais de um minuto[30] e disponíveis também de forma isolada na página do projeto[31].

Parte dos experimentos concentra-se na imensa complexidade das cáusticas, buscando revelar seus mais ínfimos detalhes e variações que habitam o "seemingly homogeneous phenomena that we are used to seeing around" (GULYAEVA, 2021). Isso fica evidente em uma das experimentações (Fig. 25), em que cáusticas maiores e brilhantes são costuradas por curvas finíssimas que se entrelaçam em conformações complexas e que podem chegar a escalas minúsculas. Para tal, as superfícies refratoras precisam ser distorcidas de formas muito específicas, o que também seria possível no mundo material. Contudo, o ambiente virtual permite um controle da geometria e outras propriedades físicas, como índice de refração e rugosidade, inalcançável no mundo físico. Isso possibilitou ao estúdio *caustic networks* incrivelmente nítidas, sem as 'sujeiras' geradas pela absorção e refração heterogênea de luz e pelos padrões de difração, tão presentes nas cáusticas físicas. Por se tratar de um controle procedural, foi possível a alteração da forma e propriedades das superfícies ao longo do tempo, gerando animações com as cáusticas, que, modificando-se gradativamente, evidenciam o universo quase infinito de possibilidades do fenômeno óptico.

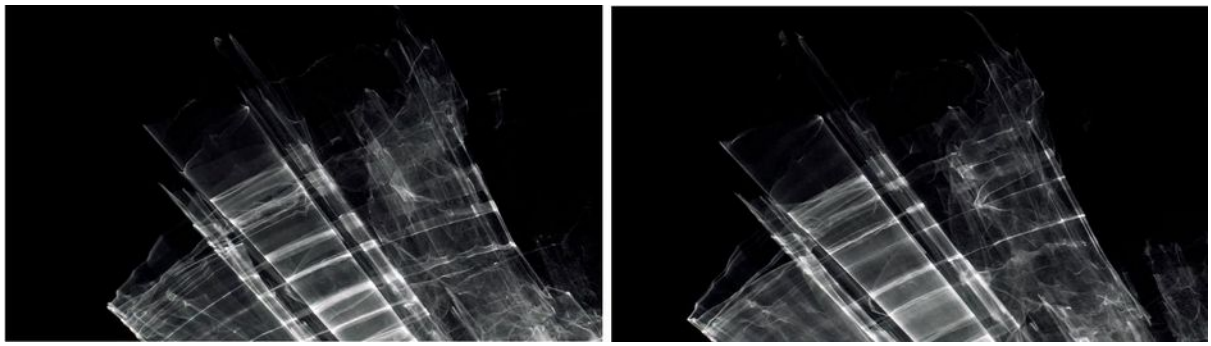

Figura 25 – *stills* de um dos experimentos do Media.Work

Fonte: página do projeto no site do grupo

30 O curta pode ser visto em <https://vimeo.com/582147658>. Acesso em: 7 mar. 2022.

31 Todos os experimentos estão reunidos em <https://media.work/project/light-transformations>. Acesso em: 7 mar. 2022.

Uma outra capacidade da computação gráfica explorada foi a de romper com as leis da física ─ que os algoritmos de renderização buscam aproximar ou replicar via de regra ─, explorando cenários não opticamente possíveis, mas “mathematically possible” (LAMBERT, 2011, p. 442).

Numa das experimentações (Fig. 26), placas de vidro animadas são omitidas, sobrando apenas suas cáusticas, refrações e sombras em movimento. Isso dá destaque para esses efeitos ópticos que, com contrastes de luminosidade bastante pronunciados, passam uma nítida impressão de profundidade no plano em que são projetados. O contraste entre sombra escura e refração luminosa são responsáveis pelas partes mais geométricas do relevo ilusório; enquanto as formas arredondadas das cáusticas – cujo brilho faz com que se sobreponham aos outros efeitos – adicionam complexidade e organicidade às elevações já existentes, funcionando quase como uma teia tridimensional a ligar as diferentes áreas mais geométricas. As conformações da impressão de relevo modificam-se em posição e profundidade conforme o movimento das placas invisíveis; e o fazem suavemente apesar de eventuais descontinuidades, em que as formas luminosas se deslocam repentinamente de um lado ao outro, provavelmente resultado das diferentes placas de vidro interseccionando-se: um romper da lei da impenetrabilidade dos corpos que modifica imediata e intensamente a direção dos raios refratados.

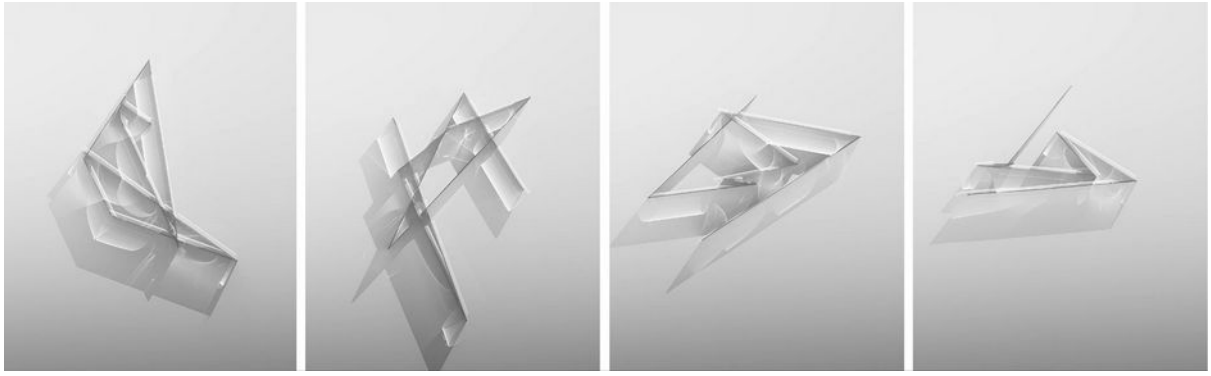

Figura 26 – *stills* de um dos experimentos do Media.Work

Fonte: página do projeto no site do grupo

Mas o objeto que gera cáusticas não precisa ser obrigatoriamente omitido, afinal a pesquisa é definida como “an internal project dedicated to examining the light within its relationships with objects” (GULYAEVA, 2021). Em um dos experimentos (Fig. 27) o observar a cáustica pelo filtro das propriedades transluzentes de seu gerador torna-se o ponto principal do trabalho, fazendo com que a luz vista através dele “looks almost like a viscous

substance” (GULYAEVA, 2021). O objeto causador das cáusticas deixa de ser apenas uma lente disforme que focaliza a luz nelas e passa a ser também uma lente que altera a percepção do espectador sobre elas. Novamente o controle preciso sobre elementos simulados mostra-se potente, já que permite a criação de peças virtuais de propriedades físicas heterogêneas, como acontece com a estrutura aproximadamente cilíndrica presente nesse experimento, cuja transparência das laterais, necessária para cáusticas finas e bem definidas, contrasta com a translucidez quase opaca da parte de cima. A heterogeneidade desse caso pode ser alcançada também no mundo físico, mas a modificação que a opacidade da parte de cima sofre no decorrer da animação – ressaltando o efeito pelo contraste ao longo do tempo – não.

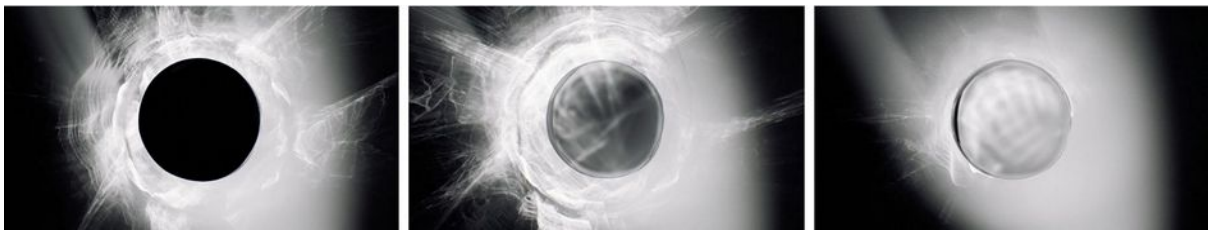

Figura 27 – *stills* de um dos experimentos do Media.Work

Fonte: página do projeto no site do grupo

A geração da tridimensionalidade da cáustica não fica restrita apenas à visão do espectador. Com o auxílio do *Houdini*[32] e sua capacidade de manipular informação dos ambientes 3D, a intensidade da incidência luminosa sob uma área é transformada em malhas tridimensionais, as quais “dançam” no espaço virtual junto dos brilhos que as geraram. Em uma das experimentações (Fig. 28), uma forma tridimensional, feita a partir de uma cáustica, emerge da superfície do plano, como uma ilha erguendo-se do oceano. Contudo, não o faz por completo: apenas as partes mais claras levantam-se para além do plano ─ correspondendo à terra seca da ilha na analogia ─, enquanto o resto da *caustic network* permanece sem ser transformada em altura, restrita ao plano como puramente luminosidade. Se o fato do brilho das cáusticas e suas cores ─ fruto, em parte, da aberração cromática simulada ─ incidirem sobre as superfícies tanto 2D quanto 3D ajuda a evidenciar a transformação de uma na outra, ele também acaba nublando as diferenças entre aquilo que é plano e aquilo não é.

32 Programa pago da empresa *SideFx* baseado na manipulação de informação dos ambientes 3D e na geração procedural.

Figura 28 – *still* de um dos experimentos do Media.Work

Fonte: página do projeto no site do grupo

A mesma técnica transformativa utilizada nessa é empregada em outra experimentação (Fig. 29), mas de forma invertida: em vez de para fora do plano, a cáustica causa uma extrusão para dentro dele. O ponto mais luminoso dela não é traduzido como aquele que mais se distancia da superfície plana e sim como aquele que a toca, enquanto os pontos menos luminosos que são extrudados para baixo; e o são em tamanha magnitude que alguns desaparecem de vista em meio à superfície translúcida do piso. Esse efeito invertido, capaz de ser entendido ambiguamente também como um reflexo de um objeto impossível ─ invisível diretamente à câmera ─, talvez seja, entretanto, mais plausível fisicamente que aquele empregado no último experimento, uma vez que, diferente daquele, neste as cáusticas não escapam dos limites da superfície em que incidem: permanecem literalmente dentro dela.

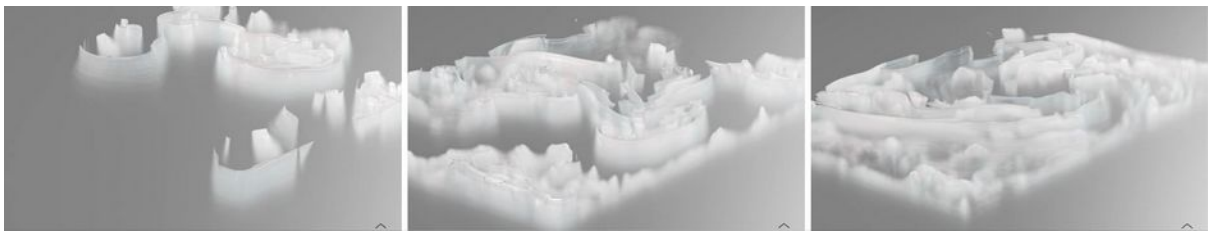

Figura 29 – *stills* de um dos experimentos do Media.Work

Fonte: página do projeto no site do grupo

Essas traduções de dados fazem parte do tratamento que o grupo faz da luz como informação. Não apenas como um recipiente de informação, que “carries information, either about its emitter or about something encountered on the way to the spectator” (GULYAEVA, 2021), ou como a velocidade da informação, da causalidade e de – por consequência – todo o conhecimento possível (MCKINLAY; SCOTT, 2015, p. 63). O grupo trata a luz como informação *per si*, que pode ser operada, transportada e traduzida em outras formas.

Os trabalhos do Media.Work não encerram as possibilidades desse tratamento da luz, apenas as apontam; e o entendimento das cáusticas, em específico, a partir desse ponto de vista parece ser um universo riquíssimo de possibilidades ainda pouco exploradas.

3 EXPERIMENTAÇÃO PRÁTICA

3.1 Possibilidades da experimentação prática com a simulação de cáusticas

A maneira como a computação gráfica trabalha com dados abstratos, desligados do mundo material e de suas limitações, possibilita um controle sobre os elementos de cena sem comparação no mundo físico. Não apenas ela permite ajuste mais fino e profundo dos elementos como também viabiliza a manipulação de propriedades que seriam impossíveis de modificar fora de um ambiente de simulação. Na renderização 3D de cáusticas os exemplos desse controle seriam: (a) os objetos que as geram podem ter sua forma completamente modificada, seja pela manipulação vértice a vértice das superfícies, seja por meios procedurais; (b) as propriedades físicas desses objetos ─ como a quantidade e cor de luz que absorvem, refratam e refletem e o índice de refração ─ são plenamente ajustáveis, o que interfere diretamente na aparência das cáusticas; (c) as luzes responsáveis por sua geração suportam ter sua cor, potência, tamanho e posição mudadas ─ havendo ainda a possibilidade de serem colocadas em locais fisicamente impossíveis, como dentro do objeto gerador da cáustica refrativa; (d) as superfícies que recebem as cáusticas podem ter os mais diversos formatos, texturas e propriedades físicas, características passíveis ainda de modificação ao longo do tempo, no caso de animações ou experiências interativas, por exemplo; (e) a "condição atmosférica" em que a cena 3D se dá ─ entenda-se, por exemplo, a presença ou não de névoa ─, é também ajustável; (f) e a própria câmera virtual que 'captura' a cena, é plenamente configurável em seus mais diversos parâmetros, como distância focal, profundidade de campo, resolução, presença ou não de distorção perspectiva[33] e também posição dentro da cena.

Todos os principais elementos responsáveis pela aparência das cáusticas estão ao alcance do controle minucioso e preciso do artista na computação gráfica, inclusive para a

33 "Câmeras" virtuais podem renderizar cenas: em perspectiva linear; em perspectiva ortográfica; com projeção panorâmica ou até mesmo, no caso de programas específicos, perspectiva hiperbólica.

geração e a captura de efeitos ópticos as quais seriam impraticáveis no mundo físico, dado às limitações que a materialidade e as leis da natureza impõem. Entre essas possibilidades exclusivas do mundo virtual, tem-se por exemplo: objetos invisíveis à câmera diretamente, mas cujas reflexões e cáusticas são ainda observáveis ─ técnica empregada em um dos trabalhos do estúdio Media.Work visto anteriormente; propriedades físicas impossíveis, como a capacidade de refletir mais luz do que é absorvida; e até posicionamentos da câmera que seriam irreplicáveis numa transposição da cena virtual para o mundo material.

Todavia, o controle não é absoluto: a simulação impõe suas próprias limitações. Cada algoritmo de renderização, por exemplo, tem suas próprias vantagens e desvantagens e mesmo as opções que se mostram as mais recomendadas para a maior parte dos casos podem não ser as mais adequadas para a criação de determinadas cenas. Além disso, as simulações não conseguem computar toda a complexidade dos fenômenos: trabalham apenas com aproximações que sejam suficientemente críveis e/ou acuradas. Essa falta de controle, contudo, pode ela mesma ser empregada pelo artista: a incapacidade de renderizar *diffraction patterns* permite cáusticas de nitidez inalcançável fora da virtualidade; e o próprio desfoque gerado como efeito colateral do *Photon Mapping* é passível de ser transformado em parte de obras por conta de suas possibilidades visuais ou até mesmo conceituais – de ser uma limitação de um algoritmo baseado em estimação.

A computação gráfica permite manipular e transformar, com uma liberdade imensa, dados de diferentes naturezas – incluindo aqueles que são frutos de supostos ‘erros’ ou limitações. Isso faz com que essa técnica seja uma ótima forma de trabalhar com os quatro tipos diferentes de tridimensionalidade das cáusticas, possibilitando ainda sua mistura. E isso não precisa ficar necessariamente restrito ao mundo virtual. Essas cáusticas tridimensionais podem ser transformadas em peças impressas em 3D ou até ter as propriedades de sua geometria sendo usadas como controladores do movimento de peças robóticas. As mesmas coordenadas que são transformadas em *pixels* nas imagens ou fótons no *Photon Mapping* podem virar luz emitida por projetores, som emitido por alto-falantes ou até movimento de esculturas cinéticas. Contudo, para que essa interação virtual-material seja a mais proveitosa, antes é necessário um aprofundamento nas possibilidades das cáusticas exclusivamente virtuais. Por conta disso, nas experimentações práticas efetuadas, focou-se nesse tipo de cáustica e em suas viabilidades.

3.2 Escolha dos algoritmos de renderização

Para uma renderização eficiente de cáusticas, sem dúvida há algoritmos menos adequados, como é o caso do *Path Tracing*. Todavia, cada um dos métodos analisados possui alguma limitação, seja de performance, de qualidade de renderização ou de quais efeitos é capaz de simular. Meneghel e Netto (2015) concluem que

> bidirectional methods such as BPT [Bidirectional Path Tracing] and, more recently, VCM [Vertex Connection and Merging] handle very well general cases, generating almost always the lowest error and highest perceptual quality scores when comparing to the reference solution, proving that the additional computation overhead is compensated by the generation of more accurate results (MENEGHEL; NETTO, 2015, p. 39).

Mas atentam ao fato de que *Light Tracing* – um algoritmo que costuma ser pouco eficiente para boa parte dos casos – pode se sobressair em cenas com cáusticas puras (Ibid. pp. 39-40).

A escolha do melhor método depende de cada caso: que tipo de cena; quais efeitos de cáusticas são necessários simular – se é necessário vê-las através de um espelho por exemplo; qual a importância das cáusticas na cena – se elas são o foco ou apenas um efeito secundário; com qual clareza precisam ser representadas – se podem estar borradas ou se precisam de extrema nitidez… Essas são, todas, questões que necessitam ser levadas em conta para a escolha do algoritmo de renderização.

Contudo, para artistas há mais em jogo do que apenas o algoritmo, sendo muito importante também sua implementação nos renderizadores *standalones* ou naqueles integrados a programas de animação e modelagem 3D, afinal, são através desses *softwares* que o artista, de fato, acessa os algoritmos. Em cada programa, os métodos de renderização serão implementados distintamente, resultando em diferenças em: performance; qualidade da simulação; recursos computacionais requisitados; *hardware* suportado; facilidade de uso por artistas; e até quais variáveis e configurações do renderizador podem ser manipuladas por eles.

Apesar disso, um conhecimento básico sobre algoritmos de renderização continua sendo relevante para que os artistas possam ter alguma base na escolha de qual renderizador usar; de qual algoritmo usar – dado que vários renderizadores oferecem várias possibilidades e podem até misturar diferentes métodos; de quais serão, mesmo que em linhas gerais, os

desafios que resultarão dessa escolha; e de quais são as possibilidades visuais, poéticas e estéticas que cada um desses algoritmos – e suas limitações – fornecem.

Após analisar as alternativas disponíveis, decidiu-se que, para a pesquisa, a melhor opção para a renderização de cáusticas era utilizar o *BlendLuxCore – plugin* gratuito que adiciona o *LuxCoreRender* ao *Blender*. Essa escolha se deu, em parte, pela facilidade de uso que apresenta a usuários de *Blender*, como é o caso do autor. Em vez de depender de um programa separado, que poderia muito bem dificultar e atrasar o desenvolvimento de trabalhos, requisitando exportação de arquivos, o *plugin* permite a renderização diretamente do *Blender*. Além disso, pesa o fato de ser um *software* gratuito e *open-source* – tal qual o próprio *Blender*. Há outros renderizadores capazes de simular cáusticas e que também podem ser implementados no *Blender* via *plugin*, como *Octane Render*[34], *V-Ray*[35] e o próprio *RenderMan*, mas o preço elevado deles pode ser um empecilho a artistas brasileiros, especialmente àqueles que não são especializados em computação gráfica e só tem a renderização 3D como uma parte de seus projetos. Para além da comodidade que oferece, escolheu-se o *BlendLuxCore* por entender que ele é um dos renderizadores capazes de simular cáusticas mais acessíveis à disposição hoje. Dessa forma, os experimentos práticos aqui mencionados poderão ser mais facilmente replicados e aprofundados sem a necessidade de *softwares* proprietários ou caros.

Para gerar cáusticas, foi utilizada a implementação do *BlendLuxCore* do *Bidirectional Path-Tracing*[36], auxiliado por um cacheamento de cáusticas via *PhotonGI*. De acordo com a documentação do programa:

> The PhotonGI cache is a way of pre-calculating light by tracing photons in advance. LuxCoreRender [e sua implementação no Blender, *BlendLuxCore*] can then use the result as a guide to render the image much more efficiently. It supports both a Indirect light cache and a Caustic cache, making it useful for a large variety of scenes (PHOTONGI, 2019)[37]

---

34 *Octane Render* é um renderizador pago desenvolvido pela empresa OTOY.

35 *V-Ray* é um renderizador pago desenvolvido pela empresa Chaos Group.

36 Abreviado como BiDir nos painéis de configuração do *plugin*.

37 Diferente do que consta na página de documentação citada – não atualizada desde 2019 –, desde a versão 2.6 do *LuxCoreRender*, tanto ele quanto sua implementação no *Blender* conseguem utilizar o *PhotonGI* em conjunto com o *Bidirectional Path-Tracing* para a otimização de partes importantes da simulação de cáusticas. Isso pode ser constatado lendo as notas de lançamentos da versão 2.6 do *software*, disponíveis em: <http://wiki.luxcorerender.org/index.php?title=LuxCoreRender_Release_Notes_v2.6&oldid=1801>. Acesso em 16 ago. 2022.

Apesar disso, vale ressaltar que o *PhotonGI* não torna o método de traçamento bidirecional capaz de renderizar cáusticas vistas através de espelhos: apenas facilita e acelera a renderização de efeitos que já são eficientemente simulados com o método.

Diferentemente do método *Path-Tracing*, que *BlendLuxCore* também tem à disposição, a implementação do *Bidirectional Path-Tracing* pelo referido *plugin* só suporta CPU e não GPU, o que causa uma penalidade grande de performance, dado que, por diferenças estruturais, CPUs não conseguem calcular paralelamente tantos raios de luz quanto GPUs. Mesmo com essa desvantagem, entretanto, o modo bidirecional fornece resultados melhores e em menos tempo do que o *Path Tracing* para a renderização de cáusticas.

Para renderizar cenas sem cáusticas e outros efeitos luminosos complexos, utilizou-se o renderizador *Path Tracer* padrão do *Blender*, o *Cycles*, dado sua maior eficiência na simulação desse tipo de cena mais simples. Seria possível utilizar o *Path Tracer* do próprio *BlendLuxCore*, mas a maior experiência com o *Cycles* tornou-o uma opção mais prática.

3.3 Primeira série de experimentos – esculturas a partir dos desdobramentos das cáusticas

Como visto, não só o comportamento, mas o próprio formato das cáusticas é regido pela teoria da catástrofe. A cáustica é uma singularidade de luz cujos formatos mais prevalentes costumam ser os mesmos das catástrofes elementares. Tendo isso em mente e levando em conta que, na referida teoria, há um desdobramento, uma superfície 3D, associada a cada singularidade, é possível pensar que cada cáustica, uma singularidade luminosa, pode ser transformada em seu desdobramento. Um exemplo ilustrativo é o experimento da fig. 30, modelado em 3D e renderizado no *Blender*[38]. Na fig. 31, é possível perceber uma cáustica de *cusp* gerada pelas bordas cilíndricas de uma caneca; na fig. 30, vê-se o desdobramento dessa *cusp*, um relevo suave que, caso planificado, voltaria a ser uma *cusp*; e, na fig. 32, o mesmo relevo é retratado de outros pontos de vista, os quais facilitam a compreensão de sua tridimensionalidade.

38 A renderização foi feita utilizando o renderizador *path tracer* padrão do *Blender*, o *Cycles*. O motivo disso é pela maior eficiência desse método de força-bruta em renderizar cenas simples, sem cáusticas ou outros efeitos luminosos complexos.

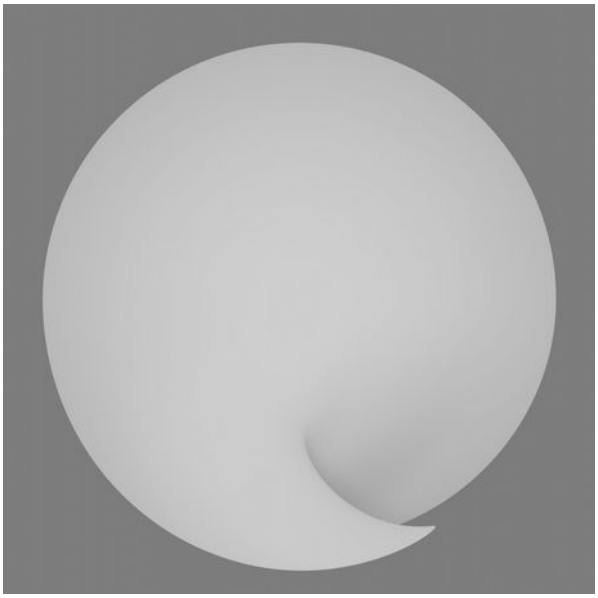

Figura 30 – Desdobramento da cáustica de *cusp* gerada por uma caneca

Fonte: o autor

Figura 31 – Simulação 3D, com o *BlendLuxCore*[39], de uma cáustica de *cusp* gerada por uma caneca

Fonte: o autor

39 Por se tratar da simulação da luminosidade de uma cáustica, foi mais eficiente utilizar o *BlendLuxCore* e seu algoritmo de *Bidirectional Path-Tracing* acompanhado de um cacheamento de cáusticas via *PhotonGI*.

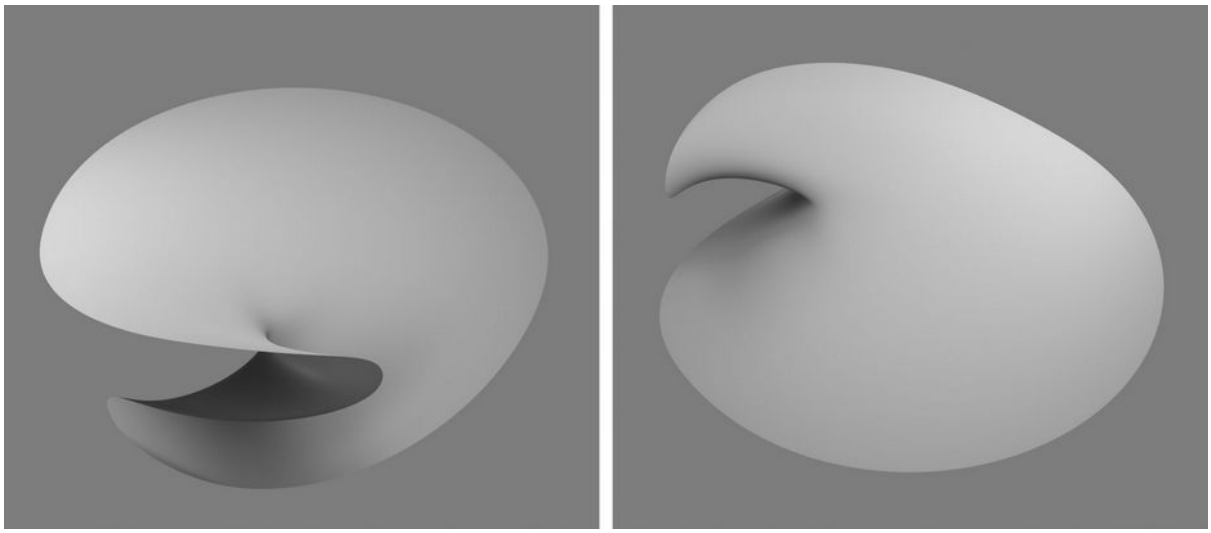

Figura 32 – Desdobramento da cáustica de *cusp* de outros pontos de vista

Fonte: o autor

Devido a opacidade da superfície do desdobramento, uma parte do relevo fica escondida sob a outra. Consequentemente, um dos ‘braços’ da *cusp* não poderá ser enxergado de um ponto de vista paralelo à superfície em que a cáustica é projetada, como é o caso da fig. 30. Isso, entretanto, pode ser solucionado aumentando a transparência ou translucidez da superfície. A fig. 33 tem o mesmo ponto de vista da fig. 30, mas sua menor opacidade permite visualizar os dois ‘braços’ da *cusp*.

Figura 33 – O mesmo desdobramento da cáustica de *cusp*, mas com translucidez

Fonte: o autor

Sem dúvida, traçar a relação entre a cáustica e seu desdobramento não é um processo automático, como aquele da ilusão de tridimensionalidade gerada pela distribuição luminosa na cáustica. Mas o acompanhamento do modelo 3D do desdobramento com um bom uso da

simulação tanto de iluminação e sombras quanto das propriedades físicas dos materiais – que recebe o nome de *shading* – pode tornar a relação mais clara, especialmente se forem providenciadas imagens com pontos de vista distintos do desdobramento. Além disso, o modelo 3D não precisa ficar restrito a uma planificação estática através da renderização, podendo ser impresso em 3D ou utilizado em obras animadas e até interativas, com o auxílio, por exemplo, de óculos de Realidade Virtual: Há muitas possibilidades no desdobramento de uma cáustica.

Para além de suas propriedades escultóricas, o referido desdobramento revela e dá forma à topologia e à matemática que regem o funcionamento e formato das cáusticas e de uma série de fenômenos. Ademais, é possível utilizar o desdobramento para relacionar a cáustica justamente a esses outros fenômenos explicados pela teoria da catástrofe, como a estabilidade de navios, os movimentos de algumas ondas do mar e até a maneira como o corpo humano e outras superfícies são planificados na retina humana, no filme fotográfico ou na imagem resultante de uma renderização 3D. Essa planificação gera contornos internos e externos, singularidades que, em sua maioria, são as 4 primeiras catástrofes elementares (MCROBIE, 2017, pp. 43-46). Um exemplo disso pode ser observado na fig. 34. Na imagem superior, vê-se as costas e uma modelo planificadas por uma fotografia; abaixo, destaca-se os contornos visíveis; e, na imagem inferior, são ilustradas as catástrofes por trás desses contornos: *folds* no caso daqueles externos e duas *swallowtails* nas áreas em que partes do corpo se sobrepõem.

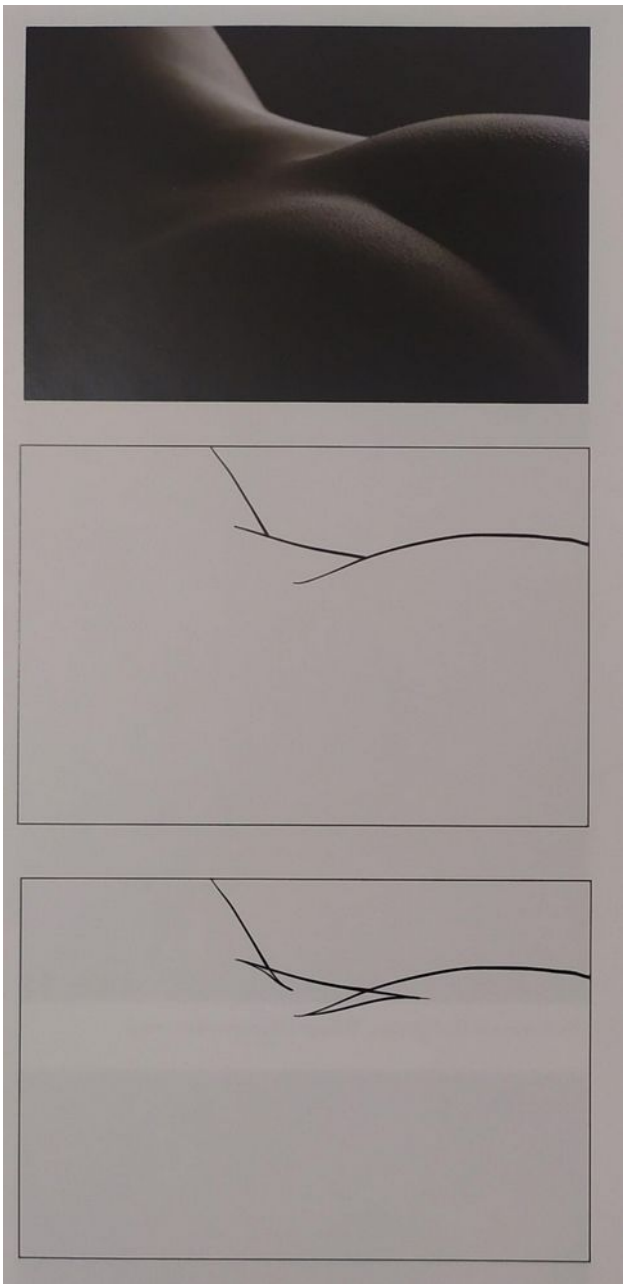

Figura 34 – Catástrofes geradas pela planificação do corpo de uma modelo numa fotografia

Fonte: (MCROBIE, 2017, p. 25)

No experimento previamente mencionado, esse ato de planificação agrega uma outra camada de sentido à escultura, pois, como será abordado mais adiante, cria uma relação de oposição com a ação de desdobramento realizada pelo artista. Uma relação antitética que evidencia o próprio processo de criação da escultura.

Esse último começa com a identificação da catástrofe presente na cáustica. Conhecendo bem as sete catástrofes elementares e treinando o olhar – para só prestar atenção

nas linhas brilhantes do fenômeno óptico, que correspondem à singularidade regida pela catástrofe[40] – e realizar essa identificação torna-se uma tarefa relativamente simples. Ao menos para as quatro primeiras catástrofes, já que, para as demais, as *umbilicals*, visualizar o desdobramento a partir da singularidade pode ser bastante desafiador, dado as auto-intersecções que ele apresentará – o que impossibilitou a experimentação com as catástrofes *umbilicals* na pesquisa.

Identificadas as catástrofes é necessário modelar seus desdobramentos, processo feito em um *software* de modelagem 3D, no caso, o *Blender*, utilizando *poly modeling* (modelagem poligonal) – baseada na criação e manipulação de vértices, arestas e faces, os polígonos. Nessa fase, é possível utilizar referências matemáticas que ilustram os formatos dos desdobramentos. Nos experimentos, usou-se McRobie (2017), dado sua maior acessibilidade e clareza. Como as catástrofes elementares possuem "estabilidade estrutural", esse processo de modelagem só precisa ser feito uma vez: depois disso, pequenas edições nos modelos-base já serão o bastante para adequá-los a praticamente qualquer singularidade de cáustica.

Contudo, antes de serem modificados, os modelos-base das catástrofes precisam ser arranjadas no espaço, colocados nas mesmas posições que as cáusticas usadas como referência, para que se adequem melhor a elas. Em nosso experimento, esse processo foi feito no *Blender*, visualizando a cena 3D através de uma câmera virtual disponível no programa. Essa foi colocada paralela à superfície em que a cáustica é projetada na imagem de referência. Dessa forma, a planificação realizada pela câmera é a mesma que as cáusticas sofreram ao serem projetadas na superfície retratada na imagem; garantindo que a direção do desdobramento, da 'desplanificação', seja igual a da planificação sofrida pela cáustica, mas no sentido inverso.

Com a finalização desse processo, agora é possível editar cada um dos desdobramentos para que se adequem melhor às cáusticas. Os modelos-base têm uma taxa de polígonos muito baixa, para facilitar a edição e, posteriormente, a união deles numa única superfície 3D contínua. No entanto, um modificador é aplicado aos modelos 3D, garantindo

40 Algo que pode ajudar nessa tarefa é editar o contraste e o brilho da imagem da cáustica usada como referência, a fim dar destaque apenas aos pontos mais brilhantes das cáusticas: suas singularidades. Todavia, nos experimentos efetuados, esse truque se mostrou menos efetivo do que o esperado, dado que nem todas as singularidades têm a mesma intensidade luminosa e um contraste muito grande pode evidenciar algumas dessas, mas apagar outras.

que, no momento da renderização, a superfície deles seja subdividida diversas vezes através do algoritmo Catmull–Clark, suavizando-a e deixando suas curvas bem definidas. A fig. 35 ilustra bem esse processo. À esquerda, tem-se um modelo 3D multifacetado por conta da baixa taxa de polígonos. Nas imagens seguintes, vê-se o mesmo modelo após a aplicação sucessiva do algoritmo de subdivisão, sendo notável como a superfície fica cada vez mais suave.

Figura 35 – Efeito do algoritmo de subdivisão de superfícies Catmull-Clark

Fonte: o autor

Para unir os diferentes modelos 3D, desdobramentos das diferentes catástrofes de uma *caustic network*, é necessário criar polígonos que os liguem, mas é preciso tomar cuidado também com a topologia. Em computação gráfica, ela se refere à maneira como os vértices conectam-se entre si e impacta fortemente em como o algoritmo de subdivisão suaviza as formas – tal qual ilustrado na fig. 36, em que a união de vários vértices num único ponto, como pode ser visto no modelo da esquerda, resulta em deformações na hora da subdivisão, como retratado à direita. Em superfícies orgânicas e cheias de curvas como a dos desdobramentos de catástrofes, é necessário tomar especial cuidado com a topologia, pois ela pode interferir significativamente na tridimensionalidade.

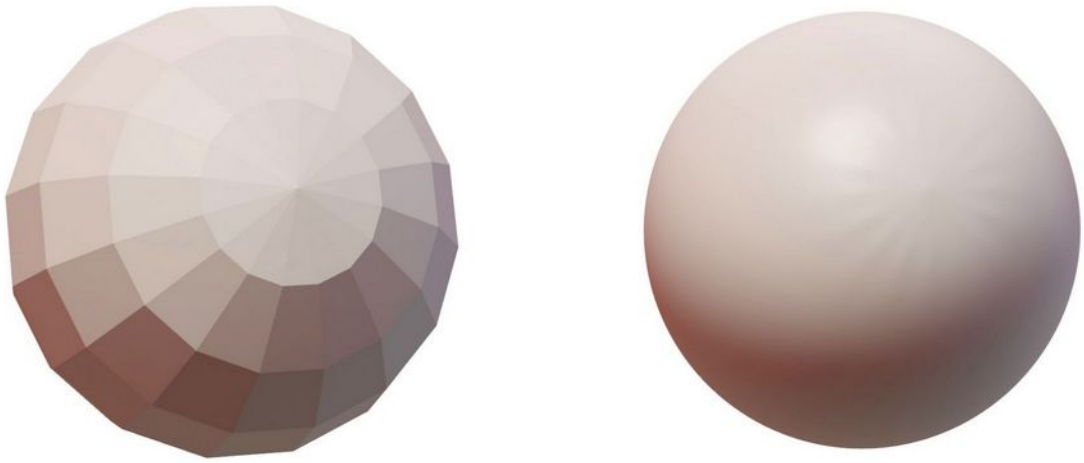

Figura 36 – Exemplo de deformação gerada por problema na topologia

Fonte: o autor

Após unir todos os modelos 3D numa única superfície de topologia boa, é possível trabalhar em cima dos outros elementos que compõem uma cena 3D. Iluminação, simulação de materiais (*shading*) e posicionamento de câmera são todas propriedades que podem ser manipuladas para gerar uma variedade de efeitos diferentes. Isso foi ilustrado pelas várias renderizações do experimento apresentadas anteriormente, todas do mesmo desdobramento da cáustica, mas com *shaders* e enquadramentos distintos. Além disso, como previamente mencionado, pode-se imprimir em 3D esse desdobramento, conferindo materialidade e até um aspecto tátil a uma parte importante do fenômeno das cáusticas. O modelo 3D, porém, precisaria ter alguma espessura e sofrer outras eventuais modificações para ser impresso – como a fig. 37 ilustra. Algumas dessas poderiam fazer com ele deixasse de ter todas as propriedades de uma variedade (*manifold*), da superfície suave com a qual a teoria da catástrofe trabalha. Por exemplo, as quinas em 90º da fig. 37 já fariam com que ela deixasse de atender a todos os critérios de ‘suavidade’ necessários para a teoria da catástrofe. Apesar disso, ela faria uma boa representação de partes importantes do fenômeno matemático, como suas curvas, relevos e declividades.

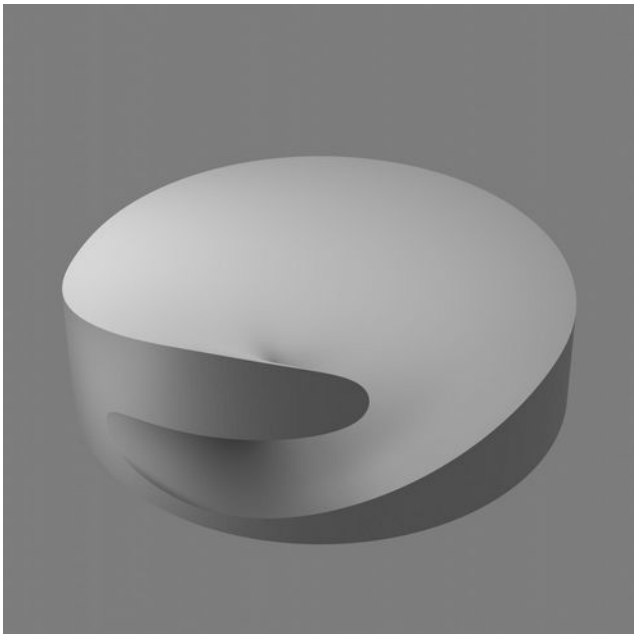

Figura 37 – Exemplo de modificações no mesmo desdobramento da cáustica de *cusp* do primeiro experimento para que fosse possível sua impressão em 3D.

Fonte: o autor

O modelo 3D foi feito através de um esforço consciente do artista em transformar em uma superfície tridimensional uma forma luminosa planificada. O espectador, ao olhar para uma escultura física, impressa em 3D, haverá o processo de planificação dela em sua retina, gerando assim outras catástrofes, potencialmente diferentes da original, aquela da cáustica. Caso o espectador olhe a escultura através de uma interação 3D em tempo real ou de uma imagem renderizada dele – como é o caso do experimento aqui exposto –, será o renderizador que fará a planificação da escultura. Em ambos os casos, porém, o olho do espectador ou o renderizador fará o processo inverso do artista e gerará novas singularidades a partir da escultura, do desdobramento que vê, num processo igual ao que ocorre na fig. 34.

3.4 Segunda série de experimentos – simulação de raios de luz

A computação gráfica também permite trabalhar com a propagação das cáusticas no espaço, dando luz a uma face desse fenômeno luminoso que normalmente é invisível aos olhos. O primeiro experimento realizado com isso buscou visibilizar os raios individuais de luz simulados, como pode ser visto na fig. 38. Para isso, foi utilizado o *Geometry Nodes* (*Geo Nodes*), uma ferramenta do *Blender* que consegue modificar a geometria e outras propriedades de um objeto 3D através de uma árvore de nós (*node tree*) que pode ser construída, programada pelos usuários. Esse tipo de ferramenta baseada em árvores de nós

costuma ser de mais fácil acesso a artistas, pois não depende do conhecimento da sintaxe de uma linguagem de programação. Contudo, há o efeito colateral de que a árvore de nós pode virar uma trama confusa e difícil de acompanhar. Para remediar isso, o artista pode agrupar diferentes nós numa única caixa colorida – chamada no programa de quadro (*frame*) – e de nome explicativo, facilitando bastante o entendimento humano.

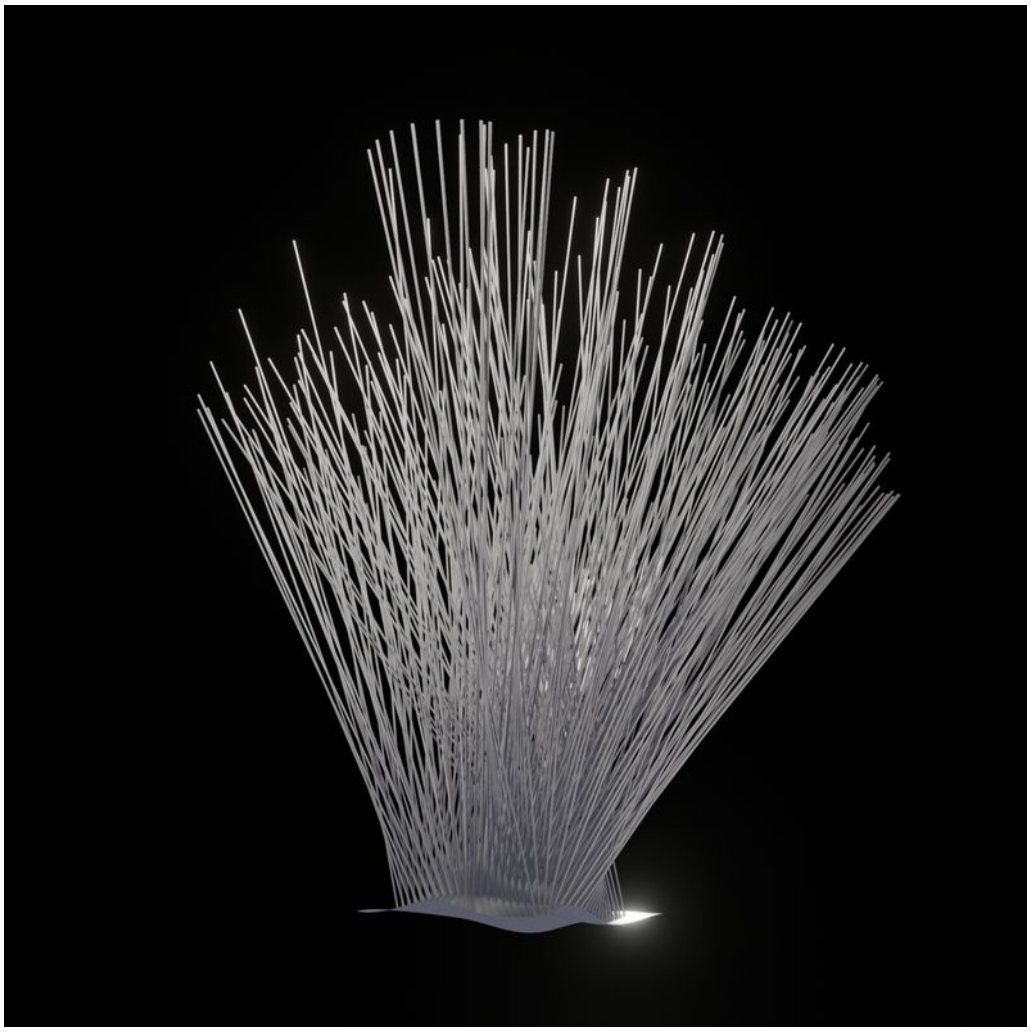

Figura 38 – Experimento de simulação da propagação, no espaço, de raios de luz refletidos por uma superfície

Fonte: o autor

Para simular a propagação dos raios de luz refletidos, primeiro usou-se um procedimento com similaridades àquele por trás de um algoritmo *Light Tracer*, embora haja algumas diferenças cruciais que serão abordadas mais adiante. Em linhas gerais, foi criada uma 'lâmpada', um plano que 'emite' raios de luz até uma superfície reflexiva ou refrativa. Nos pontos de intersecção entre os raios e essa superfície, foi calculada a direção da reflexão (ou refração) de cada um dos raios de luz. Para isso, foram necessários os vetores – as direções – desses raios; as

posições nas quais esses interseccionaram a superfície reflexiva ou refrativa; e a ‘normal’[41] da superfície nessas posições de intersecção[42]. Como resultado, obteve-se os vetores da reflexão (ou refração), a representação dos raios de luz refletidos ou refratados. Para que esses fossem visíveis na renderização e não apenas abstrações matemáticas e contas realizadas pelo computador, gerou-se objetos – cilindros no caso – que foram colocados na mesma posição e direção dos vetores. Além de fornecer espessura e visibilidade aos raios de luz, essa materialidade virtual deles permite com que interajam com o restante da cena 3D, criando sombras por exemplo.

De um ponto de vista mais técnico e específico, a árvore de nós (fig. 39) por trás desse experimento – assim como todas as do *Geometry Nodes* – possui um nó de *input*, chamado de *Group Input*, e outro de *output*, nomeado de *Group Output* (fig. 40) O *Group Input* (à esquerda) traz, para a árvore de nós, variáveis controladas pelo usuário a partir de um painel de fácil acesso. Enquanto isso, o *Group Output* (à direita) pega as geometrias e modificações geradas pela árvore de nós e aplica nos objetos da cena 3D, além de poder criar e atribuir valor a variáveis, utilizáveis por outras funções do *Blender* ou até por outras árvores de nós do *Geometry Nodes*.

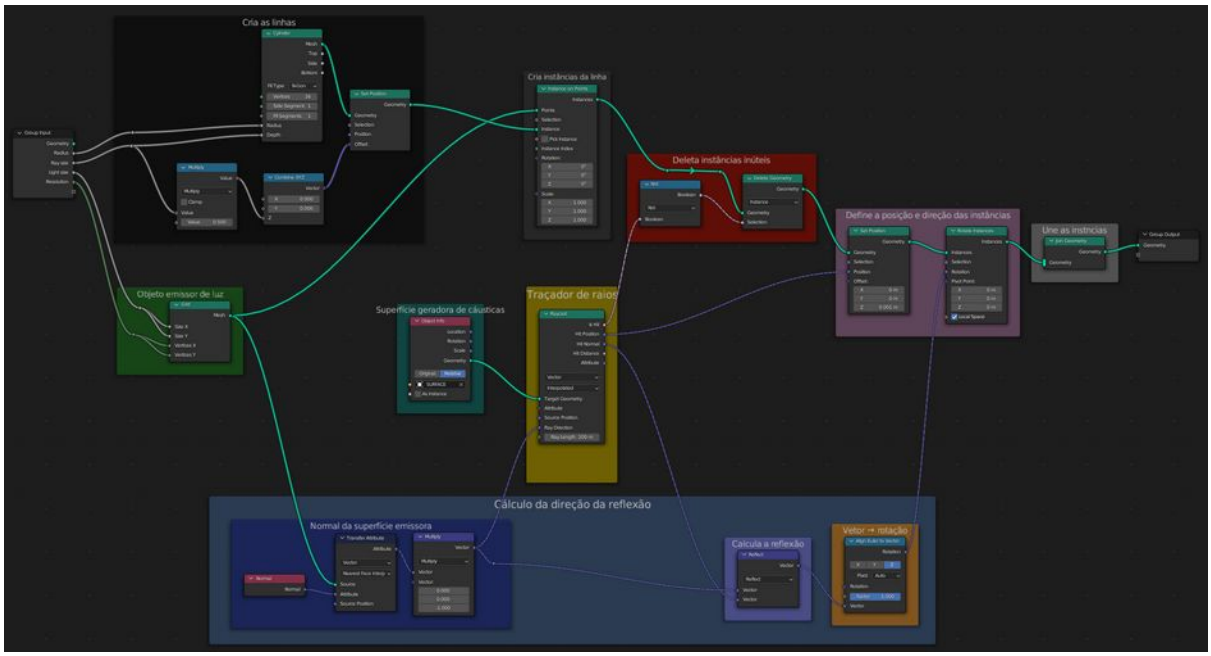

Figura 39 – Árvore de nós utilizada para a simulação e visualização de raios de luz

Fonte: o autor

41 Escreveu-se ‘normal’ para destacar que o termo é usado em seu sentido físico, de um vetor ortogonal a uma superfície. Na computação gráfica, a ‘normal’ física é usada para indicar a direção de uma superfície, dado crucial para o cálculo de reflexões ou refrações.

42 Para a simulação de refração, é necessário também o índice de refração, uma constante que indica como o material, do qual a superfície refrativa é feita, refrata a luz.

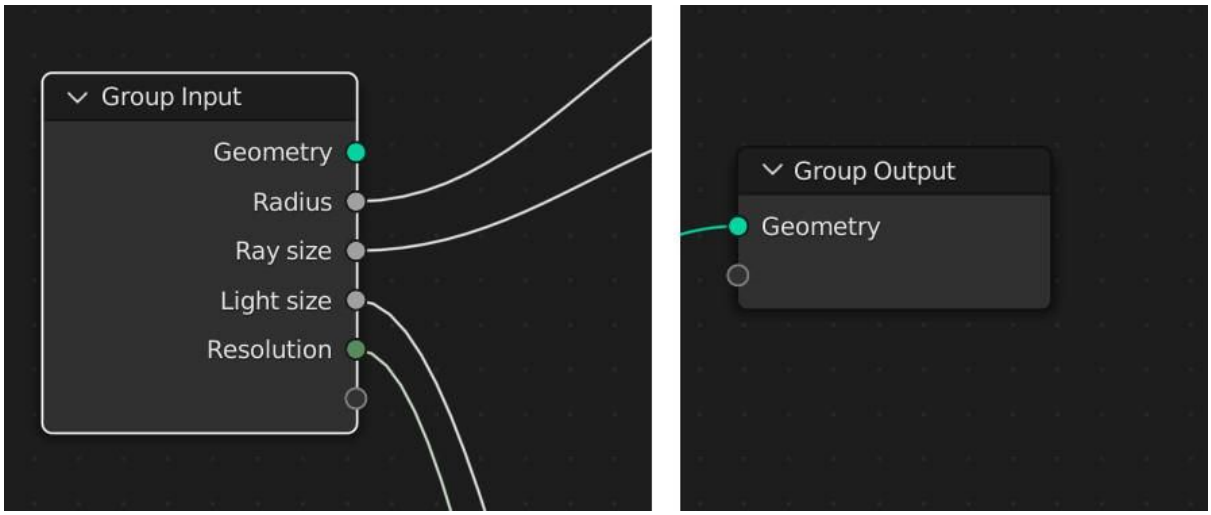

Figura 40 – Nó de *input* (esquerda) e nó de *output* (direita) da árvore de nós do experimento

Fonte: o autor

O primeiro passo das árvores de nós deste experimento é a criação de uma 'lâmpada' 'emissora' de luz, processo que é feito com o nó presente na caixa colorida verde chamada "Objeto emissor de luz" (fig. 41). Esse nó cria uma malha quadriculada (que no *Blender* recebe o nome de *grid*), a qual simula uma lâmpada do tipo área: um grande painel que gera raios de luz paralelos.

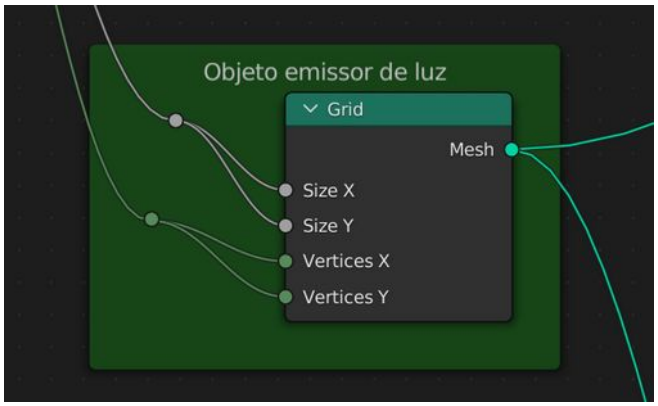

Figura 41 – *Nodes* presentes no quadro "Objeto emissor de luz"

Fonte: o autor

As informações da geometria dessa malha são passadas para o conjunto de nós que ocupa o quadro colorido azul escuro "Normal da superfície emissora" (fig. 42). Com elas, esses nós fazem com que, na posição de cada vértice da malha, seja criado um vetor que corresponde à 'normal' da face mais próxima do vértice. Vetor esse que simula a direção de um dos raios de luz 'emitido' pela 'lâmpada'.

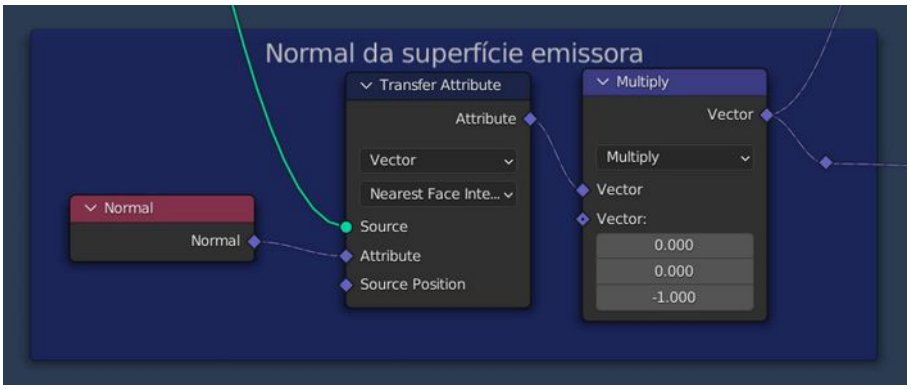

Figura 42 – Nós do quadro “Normal da superfície emissora”

Fonte: o autor

A fig. 43 ilustra isso: cada uma das linhas azuladas é a ‘normal’ de uma das faces (indicadas pelos quadrados do plano) e simula um dos raios de luz emitidos. Nota-se como todos esses são paralelos, simulando uma lâmpada do tipo área.

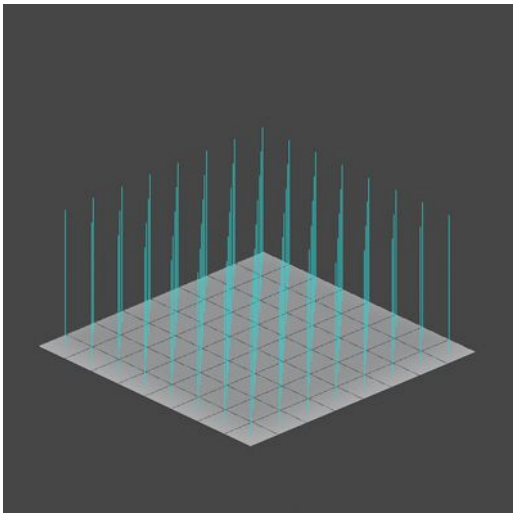

Figura 43 – Ilustração do funcionamento da malha ‘emissora’ de luz

Fonte: o autor

Um benefício de usar os vértices e as ‘normais’ da malha é que, mudando seu formato, é possível modificar a forma como a luz é ‘emitida’. Para simular uma lâmpada omnidirecional, por exemplo, basta que a malha seja esférica em vez de plana, como mostra a imagem esquerda da fig. 44. À direita, vê-se uma superfície de relevo disforme, criado proceduralmente. Seu formato gera uma distribuição de luz distinta.

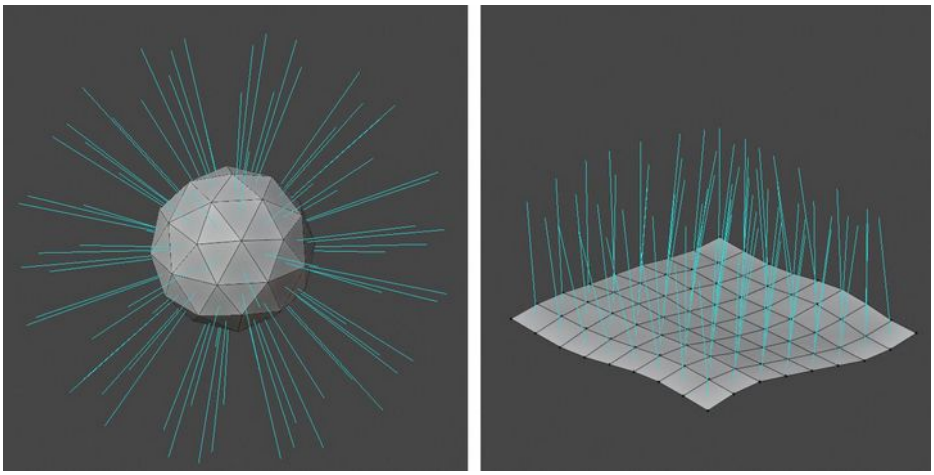

Figura 44 – Diferentes formatos da malha ‘emissora’ de luz

Fonte: o autor

Essas ‘normais’, que representam os raios de luz ‘emitidos’, são passadas até o nó do tipo *raycast* dentro do quadro amarelo “Traçador de raios” (fig. 45). Nesse nó, essas ‘normais’ serão os vetores, as direções dos raios traçados da malha ‘emissora’ de luz, a 'lâmpada', até uma “Geometria Alvo” (“*Target Geometry*”), a superfície que refletirá a luz, como ilustra a fig. 46.

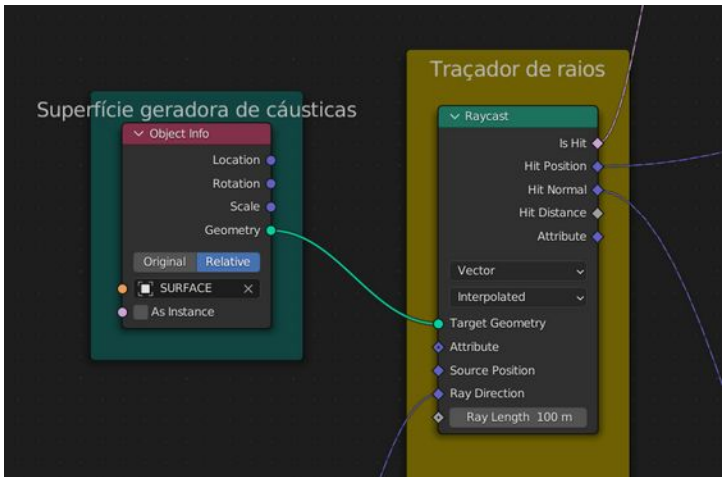

Figura 45 – Quadros “Traçador de raios” e “Superfície geradora de cáusticas”

Fonte: o autor

Figura 46 – Ilustração do processo executado pelo nó *raycast* de traçar raios (as linhas amarelas) da superfície 'emissora' (*grid* quadriculado amarelo) até a "Geometria Alvo" (relevo distorcido na parte inferior da imagem)

Fonte: o autor

Essa "Geometria Alvo" foi definida, no quadro "Superfície geradora de cáusticas" da fig. 45, como um outro objeto da cena 3D, o qual teve o formato de sua superfície previamente modificado[43] por texturas procedurais, virando um relevo desigual – a superfície reflexiva distorcida da parte inferior da fig. 46.

A similaridade do sistema da série de experimentos com o algoritmo *Light Tracer* é justamente pois, tal como neste último, os raios partem de uma fonte de luz e interseccionam uma superfície. Ocorrida a intersecção, os vetores das 'normais' das faces da "Geometria Alvo" interseccionadas pelos raios de luz foram passadas para o nó do tipo *"Reflect"*[44] do quadro "Calcula a reflexão" (fig. 47), o qual também recebe os vetores das direções dos raios de luz 'emitidos' pela 'lâmpada', simulados em "Normal da superfície emissora".

43 A modificação foi feita através de uma outra ferramenta do *Blender* chamada *displace modifier*.

44 Trocando esse nó por um outro do tipo *refract*, seria possível calcular a refração da luz, como foi feito para outras imagens da mesma série de experimentos. Além disso, vários nós de matemática vetorial podem ser combinados para simular outras interações – fisicamente acuradas ou não – da luz com a superfície em que incide.

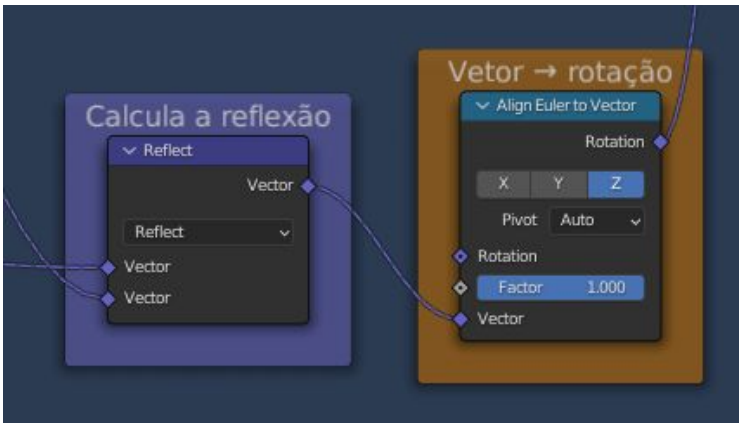

Figura 47 – Quadros “Calcula a reflexão” e “Vetor → rotação”

Fonte: o autor

Com esses dados – correspondentes, respectivamente, às ‘normais’ da superfície reflexiva e à direção dos raios de luz ‘emitidos’ que incidiram nela –, o nó “*Reflect*” calcula os vetores (as direções) da reflexão dos raios de luz, os quais são depois transformados – via o nó contido na caixa laranja “Vetor → rotação” (fig. 47) – em rotação das linhas, dos cilindros que representam os raios de luz.

A fig. 48 representa o processo de cálculo da reflexão: as linhas amarelas são os raios de luz ‘emitidos’ pela ‘lâmpada’; as azuis são as normais das faces da superfície interseccionadas por esses raios de luz; e as vermelhas são os vetores dos raios de luz refletidos, calculados pelo nó “*Reflect*” a partir das normais da face das superfícies interseccionadas e dos raios vindos da ‘lâmpada’.

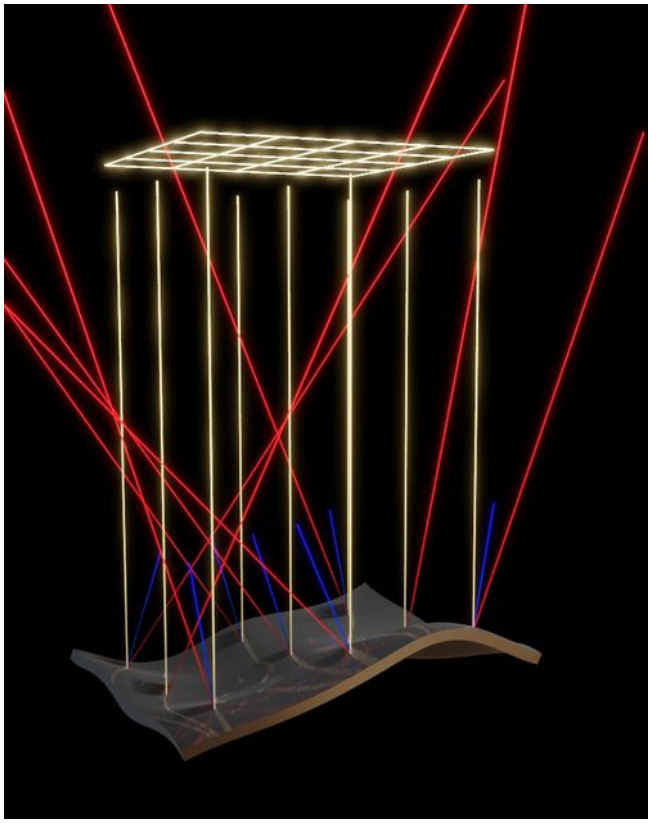

Figura 48 – Ilustração do processo de reflexão

Fonte: o autor

Para que esses vetores da reflexão sejam visíveis – em vez de apenas abstrações matemáticas utilizadas para os cálculos internos do programa –, é necessária a transformação deles em objetos 3D. A forma dos objetos foi criada no quadro preto “Cria as linhas” como um cilindro (fig. 49). Posteriormente, no “Cria instâncias das linhas”, a forma foi instanciada um determinado número de vezes, correspondente à quantidade de vértices na malha ‘lâmpada’ (fig. 50).

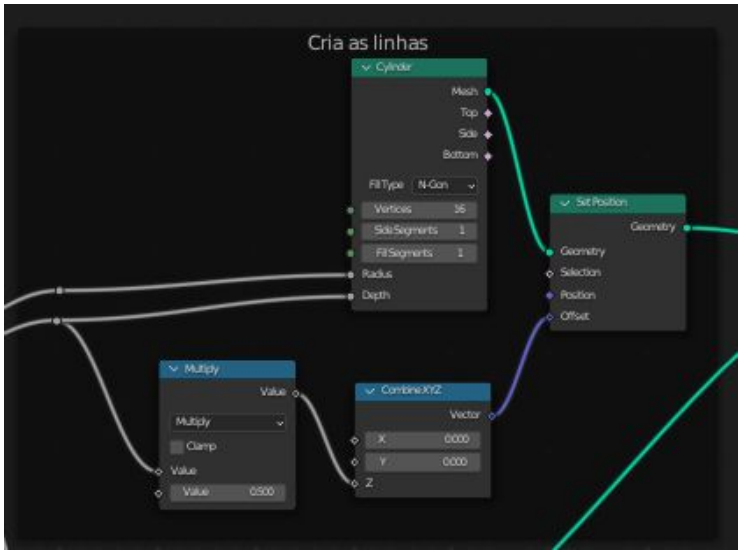

Figura 49 – Quadro “Cria as linhas”

Fonte: o autor

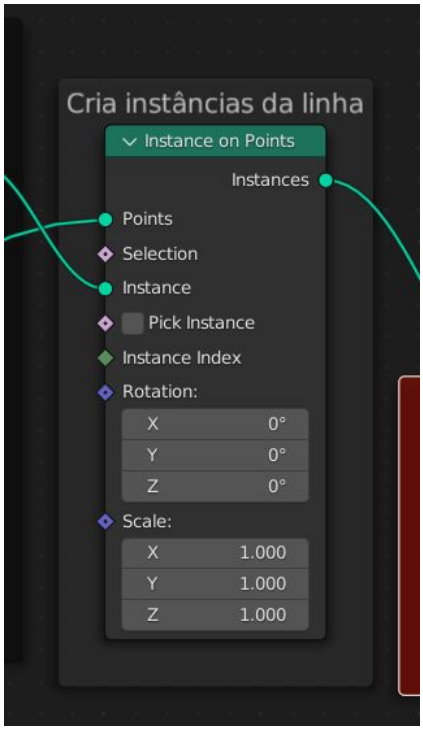

Figura 50 – Quadro “Cria instâncias da linha”

Fonte: o autor

Em “Defina a posição e direção das instâncias” (fig. 51), cada uma das instâncias foi deslocada até uma das coordenadas de intersecção da luz com a superfície refletora, coordenadas essas calculadas pelo nó *“Raycast”* mencionado anteriormente. Em seguida, as instâncias tiveram sua rotação modificada, para corresponder à direção da reflexão da luz. Aquela transformação de vetor em rotação realizada em “Vetor → rotação” foi justamente

para que, agora, seja possível modificar a direção das instâncias, apontando no sentido dos vetores dos raios de luz refletidos.

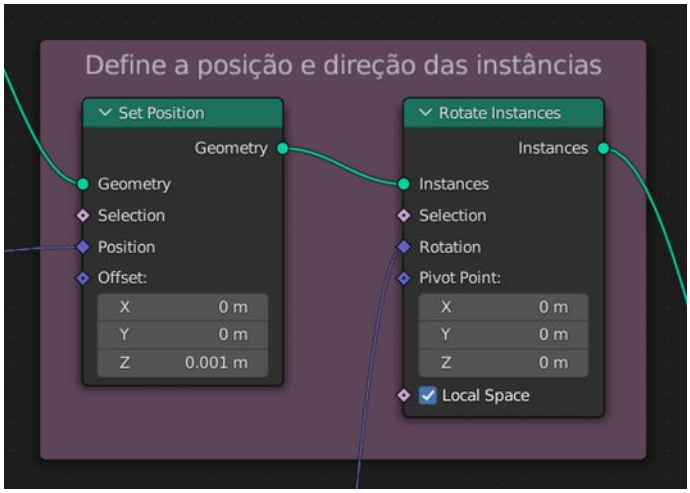

Figura 51 – Quadro "Define a posição e direção das instâncias"

Fonte: o autor

Contudo, antes das instâncias serem rotacionadas e transladadas para representarem os raios de luz simulados, passaram pelos nós contidos no quadro "Deleta instâncias inúteis" (fig. 52), responsáveis pela remoção de instâncias que não correspondem a nenhum raio de luz refletido. Esse excesso de instâncias pode ocorrer pois nem todos os raios 'emitidos' pela 'lâmpada' obrigatoriamente entram em contato com a superfície refletora e, portanto, não necessariamente geram raios de luz refletida.

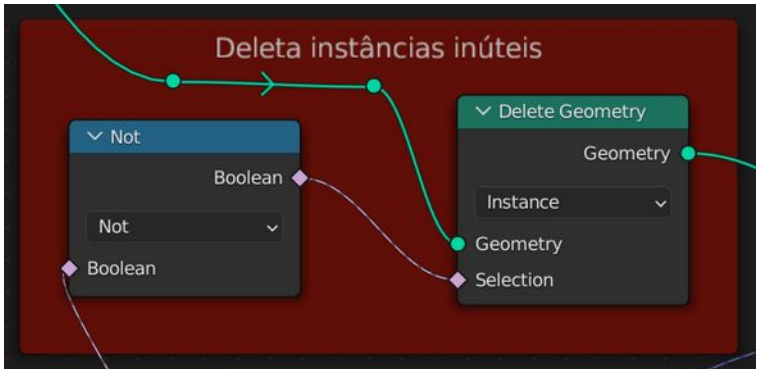

Figura 52 – Quadro "Deleta instâncias inúteis"

Fonte: o autor

Por fim, em "Une as instâncias", todos os raios de luz foram unidos numa mesma geometria, o *output* da árvore de nós (fig. 53). O resultado final foi um modelo 3D de linhas que representam os raios de luz, simulando uma faceta do fenômeno luminoso invisível no mundo físico; e no mundo digital também: como já visto, os algoritmos de renderização –

como o *Light Tracing*, no qual esta árvore de nós se inspirou – não traçam raios de luz, resolvendo tudo algebricamente.

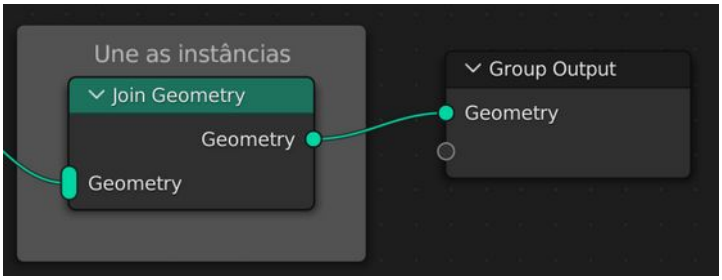

Figura 53 – Processo de união de instâncias saída da geometria como *output* da árvore de nós

Fonte: o autor

Além contornar uma limitação da visão e da renderização, desvelando os raios por trás da propagação da luz, o sistema criado mostra o caminho desses raios luminosos e a forma, por vezes complexa, como ocupam o espaço, entrecruzando-se e se interseccionando. A visualização disso é facilitada manipulando um dos *inputs* controlados pelo artista na árvore de nós: a quantidade de raios simulados. Um número grande permite entender bem a maneira como os raios se distribuem no espaço, mas pode dificultar enxergar o caminho que cada um deles faz e como se cruzam, já que um pode impedir a visibilidade do outro. Por outro lado, um número demasiadamente pequeno acaba não conseguindo representar todas as diferentes direções para as quais a luz é refletida (ou refratada) (fig. 54); além de dificultar a visualização das cáusticas, formadas pelo entrecruzamento dos raios luminosos, afinal, não há raios o bastante para criar a noção de um envelope.

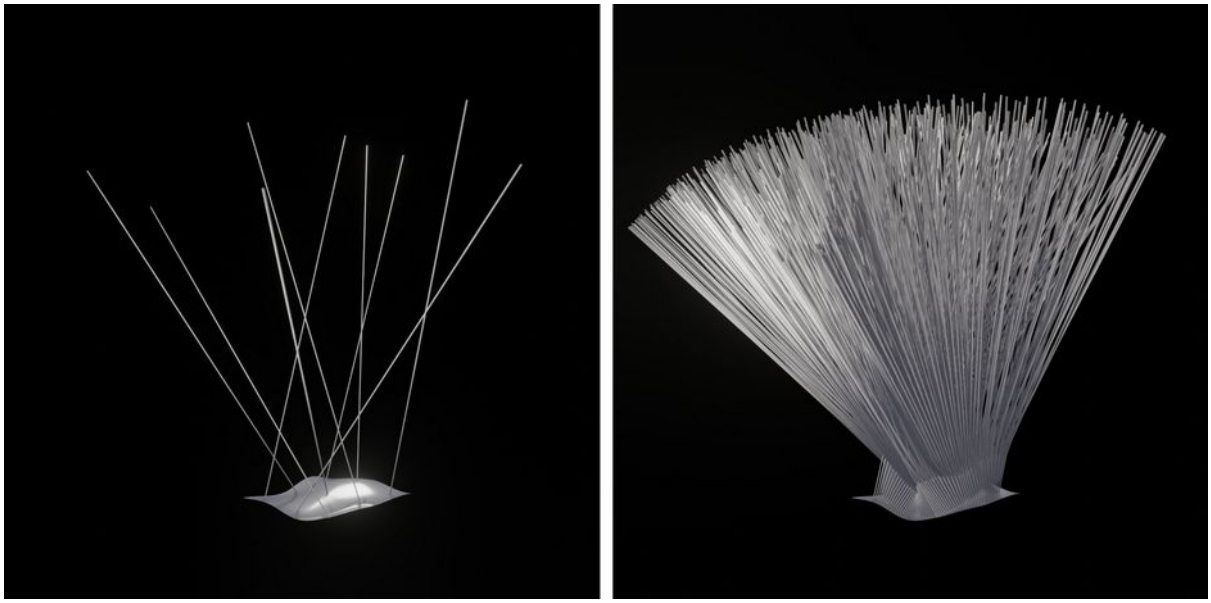

Figura 54 – Comparação entre os efeitos gerados por uma quantidade pequena (esquerda) e uma grande de raios de luz simulados (direita)

Fonte: o autor

As cores e *shaders* aplicados nos raios também são elementos sob o controle do artista. Um *shader* emissivo (fig. 55), que transforma as linhas em 'lâmpadas' 'emissoras' de luz, facilita a relação entre elas e os raios de luz que representam, mas pode dificultar a distinção de que raio está na frente de qual, afinal, sombras não aparecem em objetos muito emissivos. Um uso de cor pode amenizar essa questão, deixando clara a maneira como os raios se entrecruzam ou, em outras palavras, a forma como a luz é distribuída e organizada.

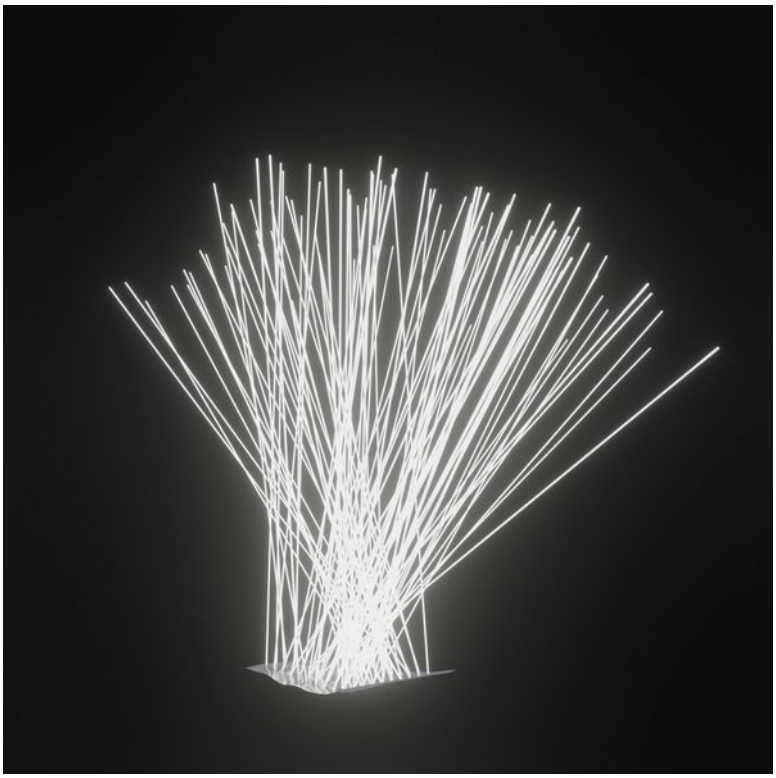

Figura 55 – Raios de luz com *shader* emissivo, que transforma a superfície deles em 'lâmpadas'

Fonte: o autor

Em mais um experimento – dessa vez com refração –, cada linha, que representa um raio de luz, tem uma cor diferente definida por um gradiente (fig. 56). Com a distinção cromática, fica mais claro o movimento dos raios de luz; como esses vieram de diferentes partes do objeto emissor; como foram refratados por regiões distintas do objeto refrativo; e como se encontraram em grupos pequenos, para formar cáusticas propagadas no espaço e que incidem num anteparo. A escolha dos tons do gradiente não é acidental: é a mesma utilizada

para representar as coordenadas UV de um objeto 3D no *Blender*. Essas coordenadas UV servem para o mapeamento de texturas 2D na superfície 3D em que são projetadas. A mesma cor usada para representar o mapeamento de texturas numa superfície é usada, no experimento, para mapear – para distinguir e evidenciar – as direções dos raios de luz que incidem numa superfície.

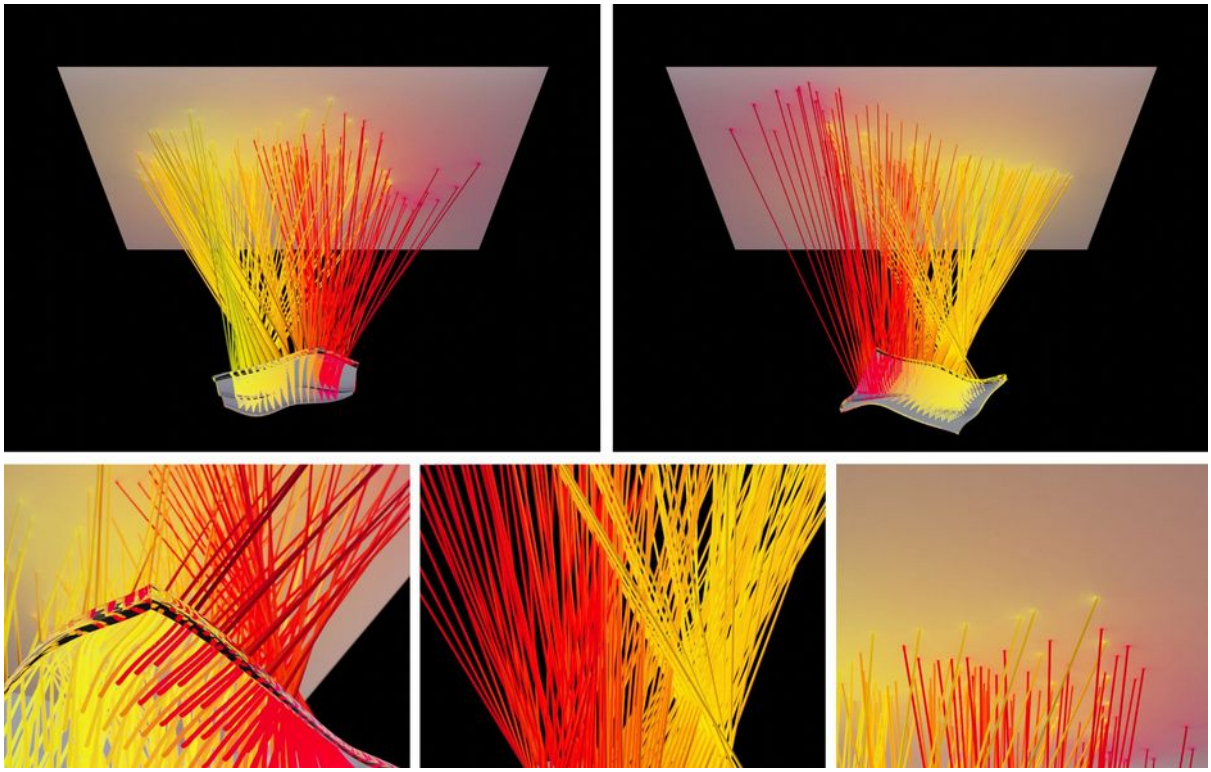

Figura 56 – Imagens do experimento com simulação de raios de luz diferenciados cromaticamente. O gradiente de cores empregado é o mesmo que representa as coordenadas UV, usadas no mapeamento de texturas

Fonte: o autor

Para salientar que os raios de luz são projetados e mapeados numa superfície, optou-se por deixá-la em evidência. Contudo, foi também necessário limitar o tamanho dos raios de luz simulados, para que terminem na intersecção com a superfície, não a atravessando. Nos experimentos anteriores, também há um limite do quanto os raios podem se propagar, mas esse é definido pelo comprimento dos raios: todos têm o mesmo comprimento preestabelecido. A vantagem conferida por esse limite via comprimento é a facilidade em entender a distribuição dos raios no espaço. Com todos terminando num mesmo comprimento, é possível – e quase automático quando a quantidade de raios simulados é grande – imaginar uma superfície que liga o topo de cada um dos raios. Essa superfície corresponde a uma *wavefront*, e acaba indicando a maneira como a luz se distribui

tridimensionalmente no espaço. Se o limite via intersecção com uma superfície facilita o entendimento do mapeamento 2D da luz nessa superfície, o limite pelo comprimento auxilia na compreensão do mapeamento 3D da luz no espaço. Ademais, ambas as opções permitem diferentes efeitos e relações que podem ser exploradas e aprofundadas por artistas, junto aos outros elementos mencionados anteriormente, como cor e quantidade de raios.

Sem dúvida, os experimentos aqui presentes não encerram as possibilidades artísticas com uma simulação de raios de luz que os torne visíveis ou com uma transformação das singularidades brilhantes das cáusticas em desdobramentos. Além disso, há muitas outras viabilidades das cáusticas e de sua simulação em 3D que podem ser exploradas.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Pesquisar as cáusticas a fundo implica num estudo aprofundado de física e óptica, áreas difíceis e cujos livros e artigos costumam ser pouco acessíveis para quem não está inserido nelas. Além disso, cáusticas são um tópico bastante específico dessas áreas de conhecimento, o que tornou ainda mais difícil e demorado achar bibliografias que fossem suficientemente profundas e, ao mesmo tempo, acessíveis.

Apesar da dificuldade, esse estudo de caráter interdisciplinar proporcionou um entendimento aprofundado sobre o fenômeno físico das cáusticas, que serviu de base para encontrar algumas de suas possibilidades visuais e conceituais. Isso foi especialmente notável na relação traçada entre cáusticas e tridimensionalidade. Com a base física e matemática, pôde-se ir além da já bem explorada ilusão de profundidade gerada pela luminosidade das cáusticas projetadas numa superfície, sendo possível experimentar com tridimensionalidades desse fenômeno físico até então inexploradas no campo das artes – ao menos até onde se sabe.

Há muitos benefícios no mergulho de artistas nessas outras áreas do conhecimento, afinal, fornecem um novo entendimento dos fenômenos os quais permeiam objetos, técnicas, materiais e conceitos que já são ou que podem ser empregados na arte. Com o mergulho, é possível enxergar outras possibilidades plásticas, visuais, poéticas, conceituais e técnicas. Um exemplo disso é Naum Gabo e a maneira como seu conhecimento de física, matemática e engenharia influenciaram no seu trabalho. Como previamente estabelecido, algumas das

curvas que explorou em suas obras são conscientemente inspiradas na matemática dos envelopes. Além disso, de acordo com Read (1948):

> The particular vision of reality common to the Constructivism of Pevsner and Gabo and the neo-plasticism of Mondrian is derived, not from the superficial aspects of a mechanized civilization, nor from a reduction of visual data to their "cubic planes" or "plastic volumes" (all these activities being merely variations of a naturalistic art), **but from the structure of the physical universe as revealed by modern science** (READ, 1948, p. 11) (grifo nosso)

De forma similar, foi o conhecimento de microscopia, das propriedades dos materiais e da física por trás das cáusticas que forneceu a base técnica e teórica para que Alan Jaras as explorasse de forma aprofundada, trabalhando de forma sistemática e artística inclusive com uma característica das cáusticas praticamente desconhecida fora das ciências naturais, os *diffraction patterns*. Apesar de habitarem a virtualidade, os trabalhos do Media.Work também fazem uso do entendimento de propriedades e da natureza da luz, mas, dessa vez, a ideia é utilizar do virtual e da computação gráfica – uma outra área do conhecimento – para conscientemente quebrar com as leis físicas e, com isso, propor cenários visualmente impactantes e conceitualmente intrigantes.

Sem dúvida, um uso mais intuitivo das cáustica – como aquele de Olafur Eliasson – também pode gerar obras visualmente interessantes e carregadas de sentido. Contudo, como visto na análise de suas produções, uma compreensão física das cáusticas e de suas propriedades pode desvelar facetas inéditas e fascinantes de seus trabalhos, expandindo-os e os potencializando. Em todos os casos analisados, as ciências da natureza enriquecem o arsenal técnico, estético e conceitual dos artistas; e estes fornecem uma visão nova, artística, sobre seus objetos de estudo.

Nos experimentos com cáustica e computação gráfica efetuados neste trabalho, os benefícios dessa relação interdisciplinar podem ser vistos nitidamente na forma das possibilidades visuais, estéticas, conceituais e poéticas do fenômeno óptico levantadas; com esse último tipo de viabilidade, poética, sendo justamente a relação artística criada entre fenômeno físico e visualidade. Trata-se de encontrar, nos conceitos físicos e matemáticos, relações estéticas e poéticas, as quais proponham uma forma nova, subjetiva, de enxergar o fenômeno e o mundo no geral, através de uma visão artística.

Na primeira série de experimentos, a matemática por trás das cáusticas foi tirada de seu uso convencional e transformada em escultura renderizada. Essa, além de possuir formas plasticamente interessantes, com sua superfície extremamente suave, mas com reentrâncias

dramáticas, proporcionou um olhar novo para as cáusticas, em que elas deixam de ser apenas projeção luminosa planificada em superfícies e viram estruturas tridimensionais inesperadas, mas que evidenciam a matemática por trás do fenômeno das cáusticas, as catástrofes. Além disso, a relação exposta nos experimentos entre: sua estrutura 3D; o processo de 'desplanificação' que a gerou; e a planificação necessária para sua visualização, carrega reflexões sobre o próprio ato de ver, fotografar e renderizar.

Na segunda série, o entendimento físico da propagação da luz como raios foi implementado na simulação, utilizando também conhecimentos advindos da computação gráfica. O resultado foram linhas representando os raios de luz propagados no espaço, o que revela uma faceta invisível do elemento mais brilhante do fenômeno luminoso, o próprio raio de luz. O sistema dos experimentos – desenvolvido utilizando a capacidade da computação gráfica de simular cenários fisicamente impossíveis, mas matematicamente viáveis – mostra o caminho da luz em vez de apenas seu destino final; e *mapeia* esse caminho invisível daquilo que torna as coisas visíveis.

O conjunto de feixes luminosos, os envelopes e os formatos de sua propagação no espaço apresentam muitas possibilidades visuais. A multiplicidade dos raios – que pode ser acompanhada de uma cromática – cria composições de grande interesse visual e altamente dependente da maneira como são enquadradas. Os envelopes – que compõem as cáusticas propagadas no espaço, resultantes da intersecção de raios de luz neste – têm formas curvadas, mas que são criadas por retas; e o aspecto quase mágico desse fato que os define matematicamente se intensifica nas imagens dos vários ângulos diferentes dos mesmos experimentos, pois mudanças no ponto de vista podem revelar novas curvas.

Algumas dessas características dos envelopes já foram exploradas em obras de outros artistas, como é o caso da *Linear Construction No. 2* de Gabo. Contudo, o fato de, nos experimentos, as linhas representarem luz, agrega novos sentidos e possibilidades exploráveis. Todas as intersecções de raios, a distribuição e mapeamento deles no espaço e a maneira como se entrecruzam, tudo isso está escondido dentro da luz e de sua propagação no espaço e o experimento justamente revela. Através disso, talvez seja possível mudar o olhar do espectador sobre a luz, simulada ou não, fazendo com que ele reflita sobre a complexidade das propriedades invisíveis da luminosidade.

Com essas duas séries de experimentos, fica clara a importância que a relação entre arte e computação gráfica pode ter. Importância tanto técnica quanto conceitual, com as próprias propriedades e características de seu funcionamento sendo empregadas para encontrar, nos conceitos físicos, relações estéticas.

O estudo da renderização 3D enfrentou problemas similares à pesquisa sobre o fenômeno físico. Mesmo com experiência prévia com computação gráfica, os artigos que

apresentam e descrevem os algoritmos de renderização são complexos e requerem um grande conhecimento de matemática, física e de jargões específicos da área. Isso obrigou uma pesquisa profunda de fundamentos da computação gráfica. Contudo, como consequência, descobriu-se os algoritmos de renderização mais adequados para a simulação de cáusticas, os quais também serviram de inspiração para a criação de ferramentas de simulação da propagação luminosa no espaço – através do *Geometry Nodes*. Essas ferramentas buscam a simulação de efeitos distintos daqueles alcançáveis pelos renderizadores, mas que os complementam. Além disso, como resultado da pesquisa sobre computação gráfica, foi possibilitado um uso mais consciente e menos automatizado das ferramentas que ela fornece, além de uma visão mais aprofundada sobre a área – tanto de suas limitações enquanto simulação de fenômenos físicos, quanto do que viabiliza justamente por isso, pelas falhas e limites.

Para o futuro, seria interessante estudar e experimentar com mais algoritmos de renderização e renderizadores, incluindo alternativas pagas ou em tempo real, mapeando as possibilidades e problemas que oferecem, sempre pensando como as qualidades e limitações dos métodos de renderização podem ser usados artisticamente. Além disso, seria proveitoso pesquisar sobre o *Next Event Manifold Estimation*, algoritmo destinado à renderização de cáusticas que foi implementado na versão 3.2 do *Blender*, mas que ainda está no começo de sua implementação, tendo suporte apenas para cáusticas refrativas.

Futuramente, seria rico experimentar com as outras possibilidades levantadas das cáusticas, incluindo os outros tipos mencionados de tridimensionalidade que permitem[45]. Para além de trabalhos de caráter experimental, seria interessante também a realização de produções artísticas – ou nas áreas de arquitetura e design – finalizadas, tendo como base este primeiro mapeamento, aqui realizado, das viabilidades artísticas das cáusticas.

REFERÊNCIAS

ALVES INACIO, Leonardo A. Light Art: a luz como matéria na construção artística. 2019. 1 recurso online (117 p.) Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Artes, Campinas, SP.

45 Não se experimentou com todos as possibilidades descobertas para que pudesse ser feita uma exploração mais aprofundada daquelas escolhidas

Berry, M., 1981. “Singularities in waves and rays” in Physics of Defects. Les Houches Lectures XXXIV, R.D. Balain, M. Kleman and J-P Poirier, Eds., North Holland, Amsterdam, 453-543.

BERRY, M. V. Disruption of images: the caustic-touching theorem. JOSA A, v. 4, n. 3, p. 561-569, 1987.

BINKLEY, Timothy. The wizard of ethereal pictures and virtual places. Leonardo, v. 22, n. 5, p. 13-20, 1989.

GALERIA TANYA BONAKDAR. Olafur Eliasson: Your ocular relief. **Tanya Bonakdar Gallery**, 2021. Disponível em: <https://www.tanyabonakdargallery.com/exhibitions/585-olafur-eliasson-your-ocular-relief-tanya-bonakdar-gallery-new-york/>. Acesso em: 7 de março de 2022.

GEORGIEV, Iliyan et al. Light transport simulation with vertex connection and merging. **ACM Trans. Graph.**, v. 31, n. 6, p. 192:1-192:10, 2012.

GULYAEVA, Anna. Media.Work, 2021. Light Transformations. Disponível em: <https://media.work/project/light-transformations>. Acesso em 11 jan. 2022.

JARAS, Alan. Twisting Light. Flickr, *s.d.* a. Disponível em: <https://www.flickr.com/photos/alanjaras/albums/72057594139866667/with/982009107/>. Acesso em 6 set. 2022.

JARAS, Alan. About. Flickr, *s.d.* b. Disponível em: <https://www.flickr.com/people/alanjaras/>. Acesso em 6 set. 2022.

KNAUS, Claude; ZWICKER, Matthias. Progressive photon mapping: A probabilistic approach. **ACM Transactions on Graphics (TOG)**, v. 30, n. 3, p. 1-13, 2011.

LAMBERT, Nick. From imaginal to digital: mental imagery and the computer image space. Leonardo, v. 44, n. 5, p. 439-443, 201

LYNCH, David K.; LIVINGSTON, William Charles; LIVINGSTON, William. Color and light in nature. Cambridge university press, 2001.

MCKINLAY, Pam; SCOTT, Terence. On caustics: a conversation. **Junctures: The Journal for Thematic Dialogue**, n. 16, 2015.

MCROBIE, Allan. The seduction of curves: the lines of beauty that connect mathematics, art, and the nude. Princeton University Press, 2017.

MENEGHEL, Giovani Balen; NETTO, Marcio Lobo. A comparison of global illumination methods using perceptual quality metrics. In: 2015 28th SIBGRAPI Conference on Graphics, Patterns and Images. IEEE, 2015. p. 33-40.

Not-yet-conceived flare from a nearby, more-than-human future. **Olafur Eliasson**, 2021. Disponível em: <https://olafureliasson.net/archive/artwork/WEK110987/not-yet-conceived-flare-from-a-nearby-more-than-human-future>. Acesso em: 7 de março de 2022.

PHOTONGI, **LuxCoreRender Wiki**, 2019. Disponível em: <https://wiki.luxcorerender.org/index.php?title=PhotonGI&oldid=1546>. Acesso em 16 ago. 2022.

READ, Herbert. Constructivism: the art of Naum Gabo and Antoine Pevsner. *In*: GABO, Naum et al. **Naum Gabo [and] Antoine Pevsner**. Museum of Modern Art, 1948.

OLSON, Ruth; CHANIN, Abraham. Naum Gabo. *In*: GABO, Naum et al. **Naum Gabo [and] Antoine Pevsner**. Museum of Modern Art, 1948.

PHARR, Matt; JAKOB, Wenzel; HUMPHREYS, Greg. Physically based rendering: From theory to implementation. Morgan Kaufmann, 2016.

REINHARD, Erik et al. On visual realism of synthesized imagery. Proceedings of the IEEE, v. 101, n. 9, p. 1998-2007, 2013.

TYLER, C. W.; A. IONE. The Concept of Space in Twentieth Century Art. Christopher Tyler Website, [s.d.]. Disponível em: <https://christophertyler.org/CWTyler/Art%20Investigations/C20th_Space/C20thSpace.html;. Acesso em 1 mar. 2022.

WYELD, Theodor. The Implications of David Hockney Thesis for 3D Computer Graphics. In: **Knowledge Visualization Currents**. Springer, London, 2013. p. 129-145.

Your ocular relief. **Olafur Eliasson**, 2021. Disponível em: < https://olafureliasson.net/archive/artwork/WEK110960/your-ocular-relief>. Acesso em: 7 de março de 2022.

ZEEMAN, E. Christopher. Catastrophe theory. **Scientific American**, v. 234, n. 4, p. 65-83, 1976.

ZELTNER, Tizian; GEORGIEV, Iliyan; JAKOB, Wenzel. Specular manifold sampling for rendering high-frequency caustics and glints. ACM Transactions on Graphics (TOG), v. 39, n. 4, p. 149: 1-149: 15, 2020.