

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

“Julio de Mesquita Filho”

Instituto de Artes – Campus São Paulo

DANIEL SEDA PEREIRA DE MORAES

**MODORITUK:
O PROCESSO DE CRIAÇÃO DE UMA OBRA
COM FABRICAÇÃO DIGITAL**

São Paulo

2025

DANIEL SEDA PEREIRA DE MORAES

**MODORITUK:
O PROCESSO DE CRIAÇÃO DE UMA OBRA
COM FABRICAÇÃO DIGITAL**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Artes, do Instituto de Artes, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” para obtenção do título de Doutor em Artes.

Linha de Pesquisa: Processos e Procedimentos Artísticos

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Rosangela da Silva Leote

São Paulo

2025

Ficha catalográfica desenvolvida pela Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação
do Instituto de Artes da UNESP. Dados fornecidos pelo autor.

M827m Moraes, Daniel Seda Pereira de (Daniel Seda), 1973-

ModoriTuk : o processo de criação de uma obra com fabricação digital /
Daniel Seda Pereira de Moraes. -- São Paulo, 2025.
140 f. : il. color.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Rosangela da Silva Leote.

Tese (Doutorado em Artes) – Universidade Estadual Paulista (UNESP),
Instituto de Artes, São Paulo.

1. Arte. 2. Arte e tecnologia. 3. Arte interativa. 4. Criação (Literária, artística,
etc.). 5. Impressão tridimensional. I. Leote, Rosangela (Rosangela da Silva
Leote). II. Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Artes, São
Paulo. III. Título.

CDD 776.4

Bibliotecária responsável: Catharina Silva Gois - CRB/8 11323

DANIEL SEDA PEREIRA DE MORAES

**MODORITUK:
O PROCESSO DE CRIAÇÃO DE UMA OBRA COM FABRICAÇÃO DIGITAL**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Artes da Universidade Estadual Paulista (UNESP), Departamento de Artes Visuais do Instituto de Artes do *Campus* Barrafundada, São Paulo, para obtenção do título de Doutor em Artes.

Área de Concentração: Artes Visuais
Tese aprovada em: 19/08/2025

Banca Examinadora:

Prof.^a Dr.^a Rosangela da Silva Leote
Presidente - Orientadora
UNESP – Instituto de Artes

Prof. Dr. Fernando Fogliano
UNESP – Instituto de Artes

Prof.^a Dr.^a Artemis Maria Francelin Sanchez Moroni
CTI Renato Archer

Prof. Dr. Gustavo Henrique Torrezan
Escola de Belas Artes - UFMG

Prof.^a Dr.^a Ivete Pinheiro Lima Rubini
Universidade de São Caetano do Sul

RESUMO

Esta pesquisa registra e discute o processo de criação de uma obra de arte interativa denominada ModoriTuk. A obra consiste em um sistema de módulos que podem ser conectados para criar diversas estruturas dinâmicas. Este sistema de criação de formas foi desenvolvido pelo autor desta tese entre os anos de 2019 e 2021. Este processo de criação fez uso de software livre e a obra foi criada para ser impressa em 3D. O ModoriTuk está publicado em código aberto. Para a criação desta obra foram definidos e utilizados os conceitos de modelo mental e programação da matéria. Esta tese defende o uso de ambos como parte fundamental dentro do desenvolvimento desta uma obra de arte original, o sistema ModoriTuk.

Palavras-chave: Impressão 3D. Modelo mental. Matéria programável. Fabricação digital. Processos criativos.

ABSTRACT

This research records and discusses the creation process of an interactive work of art called ModoriTuk. The work consists of a system of connectable modules able to create innumerable dynamic structures. This form creation system was developed by the author of this thesis between 2019 and 2021. During this creative process free softwares were widely used and the work is aimed to be printed in 3D. ModoriTuk is published in open source. For the creation of this work, the concepts of mental model and programming of matter were defined and used. This thesis defends the use of both as a fundamental part within the development of an original work of art, the ModoriTuk system.

Keywords: 3D printing. Mental model. Programmable matter. Digital manufacturing. Creative processes.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 — Fotografia de uma recriação contemporânea do <i>karakuri</i> criado por Takeda Omi em 1662 ao qual esta tese se refere em diversos momentos.....	14
Figura 2 — Quadro com a relação dos 20 aminoácidos que formam as proteínas necessárias aos seres vivos.....	27
Figura 3 — Quadro com a relação das 5 bases nitrogenadas.....	27
Figura 4 — Fotografia de uma escultura de papel de Daniel Seda denominada de Sedatoy	42
Figura 5 — Fotografia do Sirigami, uma escultura robótica feita de papel de autoria de Daniel Seda. Obra integrante da série denominada de OriBots.....	42
Figura 6 — Fotografia de quatro módulos de origami de origens diversas usadas por Daniel Seda na composição dos SedaToys e dos OriBots.....	43
Figura 7 — Imagem do ambiente do software Blender com modelagem de módulos quadrados e triangulares.....	44
Figura 8 — Composição com registros da tela do software e fotografias da impressão feita em PLA.....	45
Figura 9 — Fotografias mostrando rascunho em papel e realização de protótipo em impressão 3D com filamento PLA.....	46
Figura 10 — Oito módulos triangulares impressos em PLA branco conectados.....	47
Figura 11 — Nove módulos triangulares impressos em PLA branco conectados.....	48
Figura 12 — Quatro módulos triangulares impressos em PLA branco conectados.....	49
Figura 13 — Composição de módulos impressos em 3D com PLA branco.....	50
Figura 14 — Composição de imagens de <i>Playmobil</i>	52
Figura 15 — Composição de imagens do boneco original Tuk.....	53
Figura 16 — Jarros canópicos representando deuses do Egito Antigo.....	54
Figura 17 — Composição de fotografias mostrando os modelos da Mosca Modular e do boneco Tuk com suas variações.....	55
Figura 18 — Registros de combinações do mesmo módulo, o ModTuk, formando estruturas estáveis e dinâmicas apenas a partir de sua repetição.....	56
Figura 19 — Alguns dos módulos integrantes do Sistema ModoriTuk e algumas de suas variações.....	60
Figura 20 — Conjunto de peças ModoriTuk conectadas formando um fungo brotando um	

chapéu, impresso em PETG.....	61
Figura 21 — Escultura japonesa de um grupo de fungos.....	62
Figura 22 — Composição de fotografias de conjunto de peças ModoriTuk que quando conectadas formam o modelo de um micélio.....	63
Figura 23 — Sistema de notação contemporâneo mostrando o passo a passo de como dobrar um <i>tsuru</i>	76
Figura 24 — Primeiro registro impresso do padrão de dobras de um <i>tsuru</i> de origami.	77
Figura 25 — Ilustração explicativa sobre dobras de vale e dobras de montanha.....	78
Figura 26 — Padrão de dobras e origami correspondente.....	79
Figura 27 — Círculo trigonométrico com exemplo de ângulo.....	80
Figura 28 — Origami cinético: pássaro que bate asas.....	80
Figura 29 — Origami Moving Cubes, obra de Jo Nakashima.....	81
Figura 30 — Recriação contemporânea do karakuri registrado por Hosokawa Hanzo Yorinao no livro <i>Karakuri Zui</i>	83
Figura 31 — Peças do Sistema ModoriTuk alterando suas posições a partir de giros....	85
Figura 32 — Duas peças do Sistema ModoriTuk mudando de posição.....	86
Figura 33 — OriBot, obra de Daniel Seda.....	87
Figura 34 — Robô T-1000, personagem do filme O Exterminador do Futuro: O Dia do Julgamento.....	90
Figura 35 — Três momentos da dobra Miura.....	92
Figura 36 — Sonda Space Flyer.....	93
Figura 37 — M-Blocks.....	94
Figura 38 — O artista Theo Jansen explicando o mecanismo de sua criação.....	97
Figura 39 — Desenvolvimento de um software pelo artista Theo Jansen.....	98
Figura 40 — Sedatoy, escultura de papel de Daniel Seda.....	104
Figura 41 — ModoriTuk, escultura interativa impressa em 3D de Daniel Seda.....	105
Figura 42 — Estudos para módulo com garrafas plásticas.....	107
Figura 43 — Estudos para módulo com garrafas plásticas.....	108
Figura 44 — Estudos para módulos inspirados por origami.....	109
Figura 45 — Três estudos para módulos inspirados por origami.....	110
Figura 46 — Estudos para módulos inspirados por origami.....	112
Figura 47 — Estudos para módulos inspirados nos sólidos platônicos.....	113
Figura 48 — Impressão 3D do boneco Tuk.....	114

Figura 49 — Mosca Modular.....	116
Figura 50 — Impressão 3D do boneco Tuk alterado com 3 versões de cabeça.....	116
Figura 51 — Modelagem 3D do boneco Tuk alterado com 2 versões de pernas.....	117
Figura 52 — Modelagens 3D das versões do sistema em desenvolvimento.....	119
Figura 53 — Registro da versão 250 do Sistema ModoriTuk.....	120
Figura 54 — Módulo ModTuk.....	121
Figura 55 — Variações do Módulo ModTuk.....	122
Figura 56 — Variações de micélios usando os módulos do Sistema ModoriTuk.....	125
Figura 57 — Máquina de reciclagem de garrafas PET, a ReciclETA.....	130

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	12
2 METODOLOGIA.....	22
2.1 Autores e teorias consultadas.....	22
2.2 A prática do desenvolvimento criativo.....	30
2.3 Códigos abertos.....	30
3 MODELOS MENTAIS.....	33
3.1 A descoberta de um conceito.....	33
3.2 Mapas cerebrais.....	33
3.3 Mapeando as influências.....	35
<i>3.3.1 Freud e as associações inconscientes.....</i>	<i>35</i>
3.4 Os experimentos mentais da ciência.....	36
<i>3.4.1 Carl Sagan e o modelo mental.....</i>	<i>37</i>
<i>3.4.2 Os modelos mentais na divulgação científica.....</i>	<i>38</i>
<i>3.4.3 O famoso modelo mental do gato.....</i>	<i>38</i>
<i>3.4.4 Outros modelos importantes.....</i>	<i>39</i>
3.5 Modelos mentais na arte tecnológica.....	40
3.6 Modelo mental da criação do ModoriTuk.....	41
3.7 Modelos mentais na cultura, arte e filosofia.....	56
<i>3.7.1 Enfim o modelo de um rizoma.....</i>	<i>61</i>
3.8 Criando com conceitos científicos.....	64
<i>3.8.1 Modelos mentais no ensino de ciências exatas.....</i>	<i>67</i>
3.9 Minha definição de modelo mental.....	68
<i>3.9.1 Associações livres anteriores que me levaram ao conceito de modelo mental.....</i>	<i>71</i>
4 A MATÉRIA PROGRAMÁVEL.....	75
4.1 Duas maneiras de programar a matéria.....	75
<i>4.1.1 Origami como matéria programável.....</i>	<i>76</i>
<i>4.1.2 Autômatos como matéria programável.....</i>	<i>82</i>
4.2 Dos autômatos aos OriBots.....	85
4.3 Dos autômatos celulares à matéria programável.....	88
4.4 Matéria programável na criação artística.....	94
4.5 Imaginando modelos de matérias programáveis.....	100

4.6 Criação do ModoriTuk como matéria programável.....	103
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	127
5.1 Recicleta, um subproduto do ModoriTuk.....	129
REFERÊNCIAS.....	132

1 INTRODUÇÃO

Esta pesquisa se iniciou com o objetivo de investigar e sistematizar a questão da programação da matéria. Durante o processo de estudos relacionados a esta questão, surgiu também o conceito de modelo mental. Ambos os conceitos foram determinantes no desenvolvimento da pesquisa e também na criação de uma obra interativa. Esta obra, o ModoriTuk, foi o principal resultado prático da pesquisa. Todos os conceitos citados e outros que ainda serão abordados estão a serviço da compreensão deste processo criativo: a criação do ModoriTuk, portanto o verdadeiro foco desta pesquisa é a descrição do processo criativo desta obra. Os conceitos aqui descritos estiveram a serviço deste processo, e nenhum deles, seja a matéria programável ou os modelos mentais, é realmente inédito. Apesar disso, descrevo nesta tese uma versão operacional própria que acabei criando de cada um destes conceitos. E, portanto, neste volume eu defendo a tese de que ambos os conceitos, modelo mental e programação da matéria, foram necessários para a criação do ModoriTuk. A proposta aqui é descrever um processo criativo e os caminhos não seguidos e não realizados também têm grande importância e serão enfatizados quando necessário. Durante o texto irei articular as diversas maneiras como ambos os conceitos me guiaram e levaram à criação do ModoriTuk, um sistema modular de criação de formas articuladas impresso em 3D e publicado em código aberto.

A pesquisa acontece no âmbito das artes plásticas ligadas a processos tecnológicos como a fabricação digital. Conforme previamente mencionado, a pesquisa acabou por gerar uma obra na forma de um sistema original de módulos interconectáveis impressos em 3D e já publicados em código aberto. O sistema encontra-se publicado em três repositórios para projetos de código aberto: o *Thingiverse*, o *Printables* e o *MyMiniFactory*. O acesso aos links é encontrado em meu site¹.

O ModoriTuk é uma obra que pode ser entendida tanto como sendo um brinquedo quanto uma obra de arte interativa. Este sistema é uma primeira realização prática do que eu estou chamando de matéria programável: uma estrutura que pode alterar sua forma conforme a necessidade.

¹ O meu site pessoal está disponível em: <https://www.danielseda.com/modorituk> Acesso em: 08 de maio de 2025. A página dedicada ao sistema ModoriTuk também pode ser acessada pelo link www.tuk.tec.br.

Por se tratar da descrição de um processo criativo, este texto é escrito em primeira pessoa. O tempo narrativo irá se alternar conforme a descrição variar entre os objetivos anteriormente almejados, a pesquisa efetivamente realizada, as propostas em desenvolvimento e aquelas ainda não desenvolvidas e que serão inspiração para pesquisas futuras, bem como os caminhos apenas experimentados e não desenvolvidos.

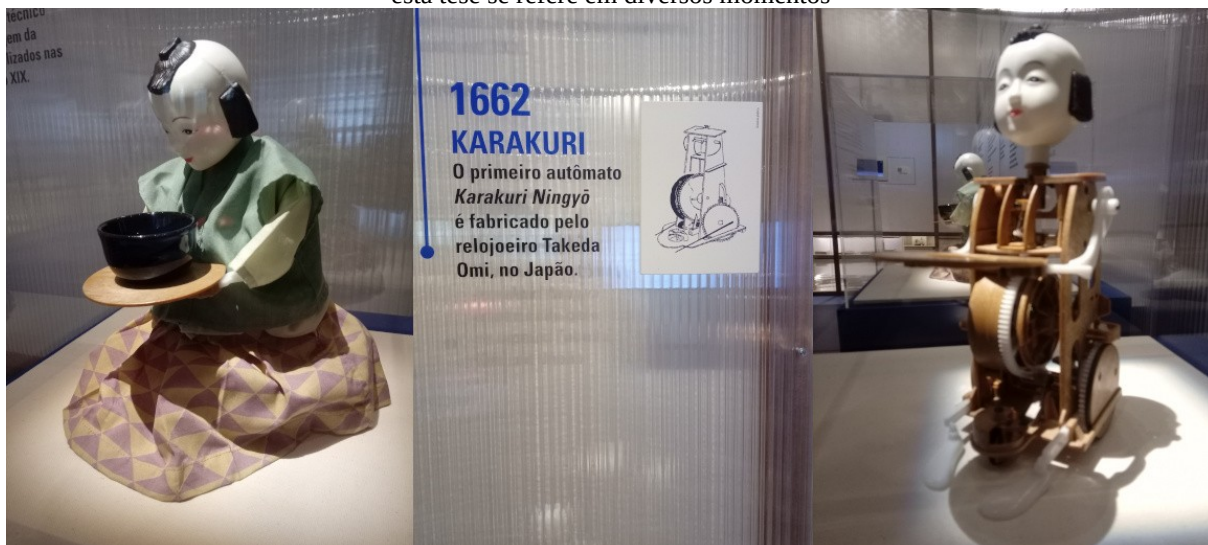
A programação da matéria é um conceito bastante recente, cuja primeira menção é do início da década de 1990; porém, há antecedentes deste conceito espalhados pela cultura. O que significa matéria programável ou programação da matéria? Quais fontes teóricas mencionam este conceito? Em quais contextos e condições ele pode ser aplicado? Estes questionamentos são abordados dentro do capítulo 4. Perseguindo o conceito de programação da matéria, acabei encontrando outro: o conceito de modelo mental. Novamente me pus à procura de suas fontes e teóricos principais, de seus usos e aplicações. Enquanto perseguia essa definição, acabei por criar uma própria, útil no contexto desta pesquisa. A discussão sobre o conceito de modelo mental acontece no capítulo 3. Na pesquisa teórica, a busca pelo conceito de programação da matéria surgiu antes e foi através dele que cheguei ao conceito de modelo mental. Mas no processo criativo real aqui descrito foi antes necessário um modelo imaginário para que as potencialidades de conexões e movimentos de ModoriTuk fossem testadas primeiro na ideia, como um modelo imaginário. Em resumo, antes de ser criado e impresso, o ModoriTuk existiu como um modelo mental. No entanto, para fins didáticos, faz mais sentido apresentar esses conceitos na ordem inversa e é por isso que neste texto apresento antes o conceito de modelo mental e só depois o de programação da matéria.

No processo desta pesquisa criativa estes dois conceitos acabaram por me guiar até o sistema modular que apresento como resultado principal, o ModoriTuk.

Nesta introdução vou discorrer sobre os caminhos teóricos e práticos pelos quais esta pesquisa passou antes de encontrar o seu rumo na criação deste sistema modular de criação de formas articuladas. O tema desta pesquisa surge ao fim do meu mestrado em 2018. No início, a pesquisa tinha como um de seus objetivos estudar os autômatos japoneses criados por Takeda Omi em 1662².

² No site do *British Museum* há o livro escrito por Hosokawa Hanzo Yorinao (1796) que publica os detalhes deste *karakuri* em 1796.

Figura 1 — Fotografia de uma recriação contemporânea do *karakuri* criado por Takeda Omi em 1662 ao qual esta tese se refere em diversos momentos



Fonte: Composição de fotografias do autor tiradas na exposição *Convivendo com Robôs* na *Japan House* em 11/04/2024.

A primeira proposta era estudar esses autômatos através do uso de sistemas de fabricação digital: cortadoras laser, CNC e impressora 3D. Estudar este autômato me parecia ideal para investigar a primeira pergunta que fiz ainda antes de iniciar o processo de pesquisa: como a própria organização da matéria programa uma sequência de acontecimentos que leva ao movimento programado (ou seja, previsível) de um autômato? A proposta incluía a fabricação do autômato e a documentação sistemática de sua produção. O conhecimento adquirido neste processo de reconstrução deste ancestral e sofisticado robô de servir chá seria utilizado na criação, em conexão com a eletroeletrônica, de uma série de obras inspiradas nestes sistemas.

Apesar de não ter concluído a construção do autômato, cheguei a estudar o seu sistema de funcionamento, imprimir em 3D e cortar a laser a totalidade de suas peças e com isso consegui entender de um modo geral como aquela forma organizada produz seu movimento programado.

Como já dito, visando mapear o processo criativo do ModoriTuk em sua complexidade, incluo neste texto a descrição dos processos não completados. Os caminhos não realizados estão essencialmente conectados aos processos efetivamente finalizados. Citando a teórica Cecília de Almeida Salles (2006, p. 20), em seu livro *Redes de Criação - Construção da obra de arte*:

Tomando a continuidade do processo e a incompletude que lhe é inerente, há sempre uma diferença entre aquilo que se concretiza e o projeto do artista que está por ser realizado. Sabemos que onde há qualquer possibilidade de variação contínua, a precisão absoluta é impossível. Nesse contexto, não é possível falarmos do encontro

de obras acabadas, completas, perfeitas ou ideais. A busca, no fluxo da continuidade, é sempre incompleta e o próprio projeto que envolve a produção das obras, em sua variação contínua, muda ao longo do tempo. O que move essa busca talvez seja a ilusão do encontro da obra que satisfaça plenamente.

Portanto, neste texto irei abordar por diversas vezes a incompletude, o erro e aquilo que não chegou a um resultado satisfatório.

A pesquisadora brasileira Monica Tavares (2016, p. 83) acrescenta mais um bloco à defesa da minha tese como uma descrição precisa de um tortuoso, confuso, porém bem-sucedido processo criativo:

Os artistas querem entender como se processa o fazer, este é seu significado. Este querer-saber-do-fazer é ir ao encontro da metalinguagem própria do artista, ou seja, aquela que diz respeito à Poética como processo formativo e operativo da obra de arte. De tal forma que, enquanto a obra se faz, se inventa o modo de fazer.

Minha abordagem neste texto parte de um mapeamento das redes inconscientes e conscientes que me levaram à criação de uma obra inspirada pelo conceito de matéria programável. Os caminhos interrompidos são parte integrante deste processo e precisam ser descritos para que esta tese cumpra a sua função de descrever como os conceitos de modelo mental e matéria programável me levaram à concepção, modelagem, impressão e publicação do ModoriTuk, sistema de criação de formas impresso em 3D e disponibilizado em código aberto.

Minha pesquisa de mestrado, da qual este doutorado partiu, tratava de outras duas linhas em convergência: o origami e a robótica de código aberto. O contato com o autômato japonês ao final da pesquisa me lembrou de uma terceira forma de organizar a transmissão de energia dentro de um sistema: a automática, porém apenas mecânica. Ao lidar com estes três modos de organização do movimento dentro da matéria (origami, robótica e automação mecânica), me veio a intuição de que poderia haver algo em comum entre eles.

Quando finalmente resolvi fazer o projeto do doutorado, consegui elaborar um fio de hipótese ao perceber o que aquelas possibilidades tinham em comum. Por isso, propus como tema inicial para esta pesquisa de doutorado a questão da *programação da matéria*, ou seja, investigar como a matéria se organiza de modo a permitir a sua mudança de forma a partir da função desejada para ela. Então a pesquisa inicialmente pensada se iniciaria com os autômatos e integraria a programação através da ação de motores controlados por um circuito integrado (p. ex., um Arduíno Nano, etc.) com um programa — esses pontos também me interessavam de início, e seguem interessando em minha pesquisa atual, embora este objetivo não tenha sido

atingido nesta etapa por motivos próprios relativos à complexidade do processo criativo e seu caráter por vezes indomável: o artista por vezes persegue o processo de criação ao invés de conduzi-lo. Outros objetivos não previstos levaram a locais criativos interessantes e promissores como a criação de uma versão da máquina de reciclagem de garrafas PET em filamento de impressão 3D, a ReciclETA. Considero esta máquina um resultado secundário desta pesquisa por ser uma variação da aplicação do ModoriTuk. A ela foi dedicado um artigo separado e uma documentação sobre o processos envolvidos em sua criação estão documentados no meu site (Seda, [2025b]).

Entre as perguntas que guiavam o projeto deste doutorado estavam como o programa e a matéria final produzida por ele se articulam num todo. O que o software tem a dizer para a matéria através do hardware? E como as peças se articulam para produzir um movimento programado? A resposta a estas perguntas é prática.

A fabricação digital integra estes elementos de forma utilitária e estas máquinas são usadas para criar obras artísticas, ensaios e experiências. E é entre dois mundos, o digital e o mecânico, um lugar nebuloso, porém manuseável, local de transição entre o mecânico e o eletrônico que quis instalar o início desta nova pesquisa de doutorado sobre a programação da matéria, que por sua vez é uma consequência direta do meu mestrado sobre Origami e Robótica (Moraes, 2018). No início desta pesquisa, o mecânico tornou-se o ModoriTuk, e o eletrônico, as máquinas de fabricação digital: computadores para criação, impressoras 3D e as cortadoras CNC e laser. Nos momentos finais desta pesquisa esta conexão analógico digital se fez plena com a criação e construção da ReciclETA, a máquina de reciclagem de garrafas PET. Esta máquina está descrita com detalhes em um artigo apresentado no 10º CIICT-SAD em maio de 2025³.

Estando às voltas com esta dualidade analógico-digital do conceito de programação, criei uma divisão que, dentro desta pesquisa, fez sentido:

A. Quando o programa é computacional. Ou seja, quando ele é uma informação digital dentro de um computador ou microcontrolador e dispara ordens para que algo aconteça, em geral através de uma máquina. Exemplo: um software que forma imagens ao controlar a luz saindo de um projetor ou de uma tela. Outro exemplo: um software que assume o controle de uma impressora 3D e cria um símile em plástico de um desenho feito num computador.

B. Quando o programa é mecânico. Ou quando está embutido na própria forma, seja do origami ou do autômato físico. As programações totalmente mecânicas são como em um relógio

³ Programação Disponível em: <https://ciact-sad.labfront.com.br/programacao/>. Acesso em: 1 de julho de 2025.

e nos autômatos de metal que reagem de acordo com a forma e as ligações de suas partes, sem um código, apenas matéria organizada em conexão com as leis da física.

O estudo de ambas as programações me interessava de início nesta pesquisa, mas acabei me concentrando criativamente a maior parte do tempo no segundo tipo de programação, o mecânico, durante os cinco anos em que a pesquisa vem se desenvolvendo e isso é abordado no capítulo 4, no qual trato da matéria programável. Por outro lado, também estudei intensamente o primeiro tipo, o eletrônico, ao utilizar as máquinas de fabricação digital como a impressora 3D, a fresadora CNC e a cortadora laser e precisar fazer uso de seus inúmeros softwares seja para modelagem, seja para fatiamento, seja para operação de máquinas.

Analisei também no capítulo 4 alguns exemplos de obras em que os artistas criam isso que estou chamando de programação da matéria. Como antecessor dessa ideia de programar um movimento autônomo na matéria inerte está Heron de Alexandria, que descreve em seu livro *Pneumática* (Alejandria, 2002), século I EC, os detalhes de projetos de sistemas automatizados a partir da relação entre os quatro elementos, água, fogo, ar e terra. Nesses processos, me interessei pelo seu modelo mental, equivocado do ponto de vista científico, porém paradoxalmente funcional do ponto de vista prático. Detenho-me um pouco mais no processo criativo de Theo Jansen, artista holandês que trabalha com arte cinética de um modo analógico. Menciono brevemente outros artistas como Erik Åberg, Jo Nakashima e Chuck Hoberman. Além destes e ainda mais importante como influência nesta pesquisa estão os Bichos de Lygia Clark. Discorro mais sobre a influência destes artistas no capítulo 4. Todos eles usam da interação humana para criar obras que mudam de forma. Uma outra inspiração importante dentro do meu processo criativo na investigação do conceito de programação da matéria veio de Daniel Rozin. Este artista trabalha em uma vertente mais ligada às tecnologias eletroeletrônicas. Ele vem desenvolvendo desde o final da década de 90 uma série de esculturas baseadas em sistemas eletrônicos que alteram a posição de certas partes, criando um efeito interativo e dinâmico. Todas as obras e artistas que mencionei também poderiam ser classificados como arte cinética e alguém mais bem informado poderia perguntar se afinal a tal matéria programável na arte não poderia ser apenas uma vertente da arte cinética. Deixo esta investigação para alguma pesquisa futura, não necessariamente realizada por mim.

Uma das questões de interesse — que trata do software x matéria — é relativa à organização da informação, da energia dentro de um computador. Como organizar essa informação digital dentro dos circuitos para que ela produza efeitos físicos esperados? Como

utilizar informação para alterar posição de motores, ligar ou desligar atuadores e sensores diversos para criar formas no mundo real, fora do computador? Minha pesquisa estudou a conexão entre a ideia ou o software que vem do programa e os músculos da máquina — isto é, os motores, a matéria da máquina que recebe a ideia-programa em forma de código de movimento, como o *gcode*, e executa a forma. O *gcode* despacha a informação e controla o movimento dos motores para que eles deslizem em eixos ortogonais efetivamente transferindo a informação digital para uma ação da máquina sobre a matéria: em uma cortadora CNC, uma broca ou fresa age sobre a madeira; em uma impressora 3D, a extrusora expela o plástico derretido (ou algum outro fluido pois existem impressoras de chocolate, argila e concreto) em camadas organizadas formando um sólido semelhante ao projetado dentro do computador. Neste doutorado comecei a entender e a controlar alguns destes processos. Estudei a programação digital através de alguns softwares de preparação para fabricação digital, seja de uma cortadora à laser, uma roteadora CNC ou impressoras 3D. Durante esta pesquisa estudei principalmente o software Blender⁴ em seus aspectos voltados à criação de modelos para impressão 3D. Também usando o Blender estudei as possibilidades de criação de modelos para dobraduras em papel. O Blender pode ser usado para criação de modelos físicos a serem cortados em uma cortadora à laser e também para modelos a serem impressos em impressoras comuns, 2D, sejam jato de tinta ou laser. Tanto no corte a laser quanto na impressão 2D os modelos são feitos para posterior montagem manual. Em ambos os casos os modelos criados no Blender precisaram passar por uma pós-produção em outro software livre de produção gráfica vetorial. Neste processo de pesquisa foi usado o Inkscape⁵. A produção de modelos tridimensionais de papel mantém uma relação com as técnicas de modelagem 3D, de origami e também atravessaram esta pesquisa.

O estudo destes softwares de produção de modelos digitais e também softwares de geração de *gcode* e de operação de todas estas máquinas fez parte desta pesquisa e me instrumentalizou para a produção dos resultados obtidos.

Para a geração do *gcode*⁶ para a impressão 3D, processo denominado de fatiamento, foram utilizados o Ultimaker Cura, o Repetier e o Prusa Slicer⁷. Para a vetorização de modelos

⁴ Blender é um programa gratuito e aberto (ou um *software* livre) publicado sob uma licença GPL desde outubro de 2002. É um programa de modelagem tridimensional que pode ser usado para diversos fins como animações, impressão 3D, criação de arte em papel (*paper craft*). Disponível em: <https://www.blender.org/about/license/>. Acesso em: 30 de agosto de 2025.

⁵ Inkscape é um programa de ilustração vetorial gratuito e aberto (ou seja, um *software* livre) publicado sob uma licença GPL. Disponível em: <https://inkscape.org/pt/>. Acesso em: 30 de agosto de 2025.

⁶ *Gcode* ou Código Geométrico é um código desenvolvido e usado para operação automática de diversas máquinas, entre elas as máquinas de fabricação digital.

⁷ Ultimaker Cura, Repetier e Prusa Slicer são três programas livres usados para fatiar modelos 3D transformando-os em *gcodes* usados para impressão 3D.

para o corte a laser foi utilizado o Inkscape. Para a geração de *gcode* para o corte a laser, o Inkscape, o Blender. Para a geração de *gcode* para corte na roteadora CNC foram utilizados o FreeCAD⁸, o OpenBuilds CAM⁹ e o Blender. E finalmente para o controle e operação da roteadora CNC foram utilizados o LinuxCNC¹⁰ e o OpenBuilds Control.

A outra questão, da organização do movimento da matéria de maneira mecânica, é descendente da roda e da engrenagem numa perspectiva ampla e herdeira da relojoaria e da astronomia: máquinas que devido aos seus componentes físicos podem ter seus movimentos organizados e programados para realizar ciclos de operação. Queria, de início, unir estes movimentos com componentes eletrônicos e criar autômatos híbridos, mecanodigitais. Ao invés disso, operei na criação artística de módulos impressos em 3D que se encaixam e se movimentam de modo mecânico a partir da interação humana. Em paralelo a isso trabalhei o digital apenas na criação, nos softwares e na operação das máquinas.

Apesar do foco desta proposta de doutorado ser outro, levei em consideração muitos dos estudos e das experiências realizadas durante o meu mestrado sobre Origami e Robótica. Durante o mestrado, realizei estudos preliminares sobre teoria do origami e sobre suas relações com a matemática e com as linguagens de programação. Descobri que existem alguns programas que trabalham a relação entre o modelo 3D e o papel a ser dobrado, começando pelo pioneiro TreeMaker de Robert J. Lang (2025) publicado na década de 80 e chegando ao Origamizer (Demaine; Tachi, 2017), criado por Tomohiro Tachi e desenvolvido em parceria com Erik Demaine em meados de 2010.

Descobri também que existem os softwares *Pepakura*, que importa modelos 3D e os transformam em uma superfície plana formada por poliedros a serem dobrados, e o *Oripa*¹¹, que converte dobras virtuais numa folha em um modelo 3D. E ao final desta pesquisa apareceu um *add-on* para o software *Blender* (Dominec, [2025]) que consegue transformar qualquer modelo poligonal em uma superfície plana a ser impressa em uma impressora comum, de papel. Todas as referências citadas encontram-se listadas junto às outras, ao final desta tese.

Para concluir esta introdução e mantendo o espírito de mapear o processo criativo do desenvolvimento do ModoriTuk, quero retomar o projeto inicialmente proposto quando do

⁸ FreeCAD é um programa aberto e gratuito para criação de estruturas paramétricas tridimensionais. Disponível em: <https://www.freecad.org/>. Acesso em: 30 de agosto de 2025.

⁹ OpenBuilds Control e OpenBuilds CAM são dois programas gratuitos usados para criação de *gcodes* e para operação de máquinas de fabricação digital como cortadoras laser ou CNC. Disponível em: <https://builds.openbuilds.com/>. Acesso em: 30 de agosto de 2025.

¹⁰ LinuxCNC é um programa aberto e gratuito para operação de cortadoras CNC. Disponível em: <https://linuxcnc.org/>. Acesso em: 30 de agosto de 2025.

¹¹ Origami pattern designer. Disponível em: <https://www.mitani.cs.tsukuba.ac.jp/oripa/>. Acesso em: 5 maio 2025.

ingresso neste Doutorado. Sei que os objetivos podem mudar ao longo de um processo de pesquisa, mas considero importante para fins de documentação de um processo criativo e para fins de registro dos caminhos realizados dentro de uma pesquisa em processos e procedimentos artísticos listar aqui os objetivos iniciais apresentados e aprovados pela banca de seleção do PPGA-UNESP.

Portanto, estas foram as propostas apresentadas em 2019 à banca de seleção que não foram totalmente realizadas. A pesquisa realizada a partir deles me permitiu estudar e sistematizar um grande repertório de possibilidades inconclusas que, sendo parte integrante dela, deixo registradas não apenas para mim, mas também para qualquer pesquisa futura que trate sobre os meandros dos processos de criação.

Os objetivos iniciais desta pesquisa eram:

- Estudar o *karakuri* japonês construindo um autômato mecânico, com engrenagens, etc.
- Entender o funcionamento das máquinas CNC de fabricação digital: cortadora laser e CNC e impressora 3D em suas características físicas, bem como a operação de seus softwares.
- Investigar as relações entre a obra de Lygia Clark e a cultura do origami.¹²
- Produzir uma série de obras-conceito disponibilizadas em código aberto.
- Articular todos esses pontos em alguns artigos e em uma tese descrevendo o caminho da pesquisa e suas conclusões.

Destes objetivos, apenas a montagem do *karakuri* não foi realizada por completo. Todas as peças necessárias para a montagem foram impressas ou obtidas, mas o decorrer da pesquisa e a execução das outras demandas e inúmeras tarefas envolvidas me fez deixar a conclusão do *karakuri* para um futuro indeterminado.

Ao invés de reconstruir o autômato japonês, criei o sistema ModoriTuk de criação de formas dinâmicas e a partir dele criei também a ReciclETA, uma máquina de reciclagem de garrafas PET. Ambos os projetos foram desenvolvidos com software livre e encontram-se publicados em código aberto. Destes, o sistema ModoriTuk é o principal resultado aqui apresentado, pois é completamente original, ao contrário da ReciclETA, que é uma versão de um outro projeto anteriormente publicado em código aberto, a Recreator3D¹³. A criação do ModoriTuk é descrita tanto no capítulo 3 quanto no capítulo 4. Em cada capítulo o foco da descrição será no tema do capítulo, ou seja, no capítulo 3, a descrição do processo de

¹² Este aspecto da pesquisa foi realizado, mas não será tratado no presente texto. O tema gerou um artigo a ser apresentado no 24º ART, em Brasília, em setembro de 2025.

¹³ Disponível em: <http://recreator3d.com/>. Acesso em: 22 abr. 2025.

desenvolvimento do ModoriTuk terá ênfase na importância dos modelos mentais e no capítulo 4 o mesmo processo é novamente descrito do ponto de vista da programação da matéria. A criação da ReciclETA, subproduto do ModoriTuk é abordada com um pouco mais de detalhes nas Considerações Finais.

2 METODOLOGIA

Ao pesquisador é exigida uma explicação de como a pesquisa foi de fato realizada, ou seja, uma descrição de sua metodologia. Sendo esta uma pesquisa na linha de Processos e Procedimentos Artísticos, ela foi dividida entre aspectos teóricos e aspectos práticos. Os aspectos teóricos envolvem os autores e as ideias que me influenciaram e me guiaram durante a pesquisa, autores que se ocuparam dos temas pesquisados e trouxeram material relevante como referenciada pesquisa. Grande parte da pesquisa consiste na produção deste texto da tese, um trabalho contínuo e exaustivo de escrita e reescrita que consiste no processamento das leituras, das práticas e das influências em geral e na tradução de toda esta experiência para ser disponibilizada primeiro para a banca e depois ao público em geral. O segundo aspecto está relacionado aos desdobramentos práticos, que neste caso são os resultados materiais produzidos com intenções poéticas e artísticas, operando uma transformação na realidade física e criando uma obra original, o ModoriTuk e uma derivação desta obra, a ReciclETA. No entanto, esta é uma divisão artificial e descrever de fato sobre como foi realizada esta pesquisa é uma tarefa complexa, que vai exigir sobretudo a paciência de quem ler este texto. Vou citar algumas referências importantes a seguir, mas as suas conexões com a pesquisa só serão devidamente explicitadas nos capítulos respectivos.

2.1 Autores e teorias consultadas

Este texto é a descrição de um processo de criação e muitas vezes a teoria se confunde com a prática e realizações práticas parecem ilustrar perfeitamente teorias lidas apenas depois. Um desses casos é uma das fontes teóricas acessadas, o volume 1 do livro *Mil Platôs*, dos filósofos Gilles Deleuze e Felix Guattari (1995) em um trecho onde os autores elencam características do rizoma. Quando li este trecho parecia estar vendo a descrição da obra que eu tinha acabado de criar. Imediatamente fiz uma relação associativa e lembrei que já tinha entrado em contato com este livro durante a minha graduação, de 1993 a 1998. Do livro lido nesta época, lembro apenas que fiquei bastante impactado, mas não entendi nada. No entanto, o impacto foi tal que mais de 20 anos depois desenvolvi uma obra que de alguma forma se relacionava com aqueles conceitos. E para explicitar uma forma como isso pode ter acontecido, aqui invoco outra influência gigantesca na minha trajetória teórica: o livro *A Interpretação dos Sonhos* de

Sigmund Freud (1987). Quando fiz a associação com esta influência inconsciente, visualizei um gigantesco modelo associativo, como uma raiz na qual todos os filamentos convergem para um ramo central, guardando e transportando por todo este tempo o impacto de uma imagem até que esta imagem fosse convertida em uma obra material feita sem a consciência dessa influência. Este modelo associativo que me veio é, por sua vez, a descrição que Freud (1987) faz de como os símbolos são condensados por meios de camadas de associações inconscientes para finalmente criar as imagens dos sonhos, os chamados conteúdos manifestos: “Se eu pudesse generalizar esse pensamento, cada sonho apresentaria em seu conteúdo manifesto um vínculo com eventos recentes, em seu conteúdo latente, porém, um vínculo com a vivência mais antiga” (Freud, 1987, p. 291).

Seguindo nesta descrição metodológica e focando ainda nas fontes teóricas às quais tive acesso, talvez a que mais represente a metodologia aqui seguida seja a descrita pela teórica Cecília Salles (2006), em seu livro *Redes de Criação - Construção da obra de arte*. Nesse processo contínuo que teve origem ao final do meu mestrado e seguiu até a conclusão deste texto, eu pude: “pensar a criação como rede de conexões, cuja densidade está estreitamente ligada à multiplicidade das relações que a mantém” (Salles, 2006, p. 17). E é no sentido de me manter fiel a uma descrição detalhada e ligada à multiplicidade das origens desta criação que me atenho a elementos que não foram desenvolvidos e concluídos, mesmo correndo o risco de soar repetitivo, pois muitos elementos estiveram presentes no meu imaginário durante o desenvolvimento da obra efetivamente realizada, mesmo que não estejam óbvios ou evidentes na obra final. Como diz Salles (2006, p.), “cabe àqueles que se interessam pela criação artística entender os procedimentos que tomam essa construção possível. Os documentos dos processos instigam um método de pesquisa fiel à experiência guardada nesses registros”, e foram inúmeras vezes em que recorri aos meus documentos, registros e arquivos dos modelos inacabados, interrompidos e abandonados, mas que foram essenciais para me conduzir à direção que finalmente gerou a obra aqui descrita.

Dentro dessas conexões e perseguindo o conceito de programação da matéria, fui atrás de artigos sobre robótica e me deparei com alguns que citavam o conceito já desde a década de 1990. A partir de meados dos anos 2000, surgem muitos outros artigos em áreas das mais diversas, como biologia proteica, design de materiais ou engenharia espacial, que também poderiam ser enquadrados dentro do conceito. Alguns destes artigos vieram do repositório JSTOR¹⁴ que, durante a pandemia, liberou o acesso à totalidade de sua base de dados

¹⁴ Disponível em: <https://www.jstor.org/>. Acesso em: 09 de maio de 2025.

gratuitamente. Outros vieram de fontes diversas, encontrados em navegações e derivas pelas redes sociais, onde acompanho uma quantidade imensa de pesquisadores dos temas mais diversos que estão frequentemente divulgando suas produções. Além disso, fui também em busca das fontes históricas das origens da ideia de uma matéria física que obedeça às ordens humanas. De todo o vasto imaginário produzido sobre o tema desde a antiguidade encontrei criadores de objetos reais que podem ser compreendidos dentro deste conceito de matéria programável como o já citado Heron de Alexandria. Também li e adotei conceitos de autores respeitados do século XX como Norbert Wiener (1968), criador do termo *cibernética*, e Jacques Monod (1971), prêmio Nobel de Química. Em seu influente, mas hoje esquecido livro *O acaso e a necessidade*, publicado em 1971, Monod descreve como moléculas com formas específicas produzem cópias de si mesmas ou variações e fazem isso há bilhões de anos, consistindo no exemplo mais perfeito da matéria programável: uma estrutura que programa a si mesma, realiza sua própria cópia e é capaz também de interromper este processo. O livro de Monod (1971) descreve perfeitamente como os sistemas biológicos já haviam realizado a estrutura autorreplicável imaginada por Von Neumann. Os trechos abaixo parecem se complementar mesmo sendo de áreas e épocas diferentes. No primeiro, um cientista da computação, uma área incipiente, imagina na década de 1940 uma estrutura capaz de se autorreplicar a partir de materiais dispersos à sua volta.

No segundo trecho, um bioquímico descreve como DNA e RNA se organizam para replicar proteínas a partir dos elementos existentes no interior de uma célula e fazem isso há milhões, bilhões de anos.

No terceiro trecho, o bioquímico parece resumir o modelo imaginado pelo cientista da computação. Portanto, as citações abaixo, traduzidas por mim dos originais citados, formam este conjunto coerente e significativo e para manter este efeito reproduzo-as em sequência:

As origens dos autômatos celulares remontam à tentativa do matemático John von Neumann de criar uma máquina autorreplicante. Em 1948, von Neumann leu um artigo no Simpósio Hixon, em Pasadena, Califórnia (“The General and Logical Theory of Automata”), no qual delineou, entre outras coisas, um plano para uma máquina autorreplicante (von Neumann refere-se de facto a essa máquina como um autômato). A questão que von Neumann aborda é a seguinte: “É possível construir um agregado de tais elementos de tal forma que, se for colocado num reservatório, no qual flutuam todos esses elementos, cada um deles se torne, no final, um outro autômato exatamente igual ao original?” Depois, Schiff apresenta o seguinte argumento para mostrar que isto é, em princípio, inteiramente exequível (Schiff, 2011, p.1).

Os seres vivos são máquinas químicas. O crescimento e a multiplicação de todos os organismos requer a realização de milhares de reações químicas através das quais são

elaborados os constituintes essenciais das células. É a isto que se chama “metabolismo”. Está organizado ao longo de um grande número de vias divergentes, convergentes ou cíclicas, cada uma compreendendo uma sequência de reações (Monod, 1971, p 45).

O organismo é uma máquina que constrói a si mesma. A sua estrutura macroscópica não lhe é imposta por forças exteriores. Ele molda-se autonomamente por meio de interações internas construtivas (Monod, 1971, p 46).

Além disso fui guiado pela visão científica de Ilya Prigogine e Isabelle Stengers (1991) em seu livro *A Nova Aliança*. Nesse livro, as autoras descrevem uma nova ciência, que assume a imprevisibilidade dos fenômenos, se tomados em sua totalidade, e também uma ciência que encara a limitação de seus métodos de pesquisa. E é também por isto que repito e insisto em registrar os erros e descontinuidades desta pesquisa e não apenas os acertos, como se tivessem sido conquistados em um processo linear e vitorioso ao invés de um lento caminho tortuoso e impreciso, como esta pesquisa de fato foi realizada. Descrever com todo o rigor possível a riqueza de um processo de criação complexo é também ser fiel a pesquisa científica.

Mas a ciência de hoje não é mais a ciência “clássica”. A própria ambição de reduzir o conjunto de processos naturais a um pequeno número de leis foi abandonada. As ciências da natureza descrevem, de ora em diante, um universo fragmentado, rico de diversidades qualitativas e de surpresas potenciais (Prigogine; Stengers, 1991, p. 5).

Jacques Monod concentrou há pouco a lição que ele julgou tirar dos progressos teóricos da biologia molecular: “A velha aliança rompeu-se; o homem sabe finalmente que está só na imensidão indiferente do Universo de que emergiu por acaso”. [...] Dissemos que a ciência podia ser descrita como uma tentativa de comunicar com a natureza, estabelecer com ela um diálogo, donde se destaquem, pouco a pouco, perguntas e respostas. [...] Como distinguir o homem de ciência moderna dum mago ou dum feiticeiro e até, no ponto mais distante das sociedades humanas, da bactéria, que também ela interroga o mundo e não cessa de pôr à prova a decifração dos sinais químicos em função dos quais se orienta? [...] Alexandre Koyré quando ele adianta que o diálogo experimental é que constitui a prática original chamada de ciência moderna (Prigogine; Stengers, 1991, p. 2).

Não são mais as situações estáveis e as permanências que nos interessam antes de tudo, mas as evoluções, as crises e as instabilidades. Já não queremos estudar apenas o que permanece, mas também o que se transforma, as perturbações geológicas e climáticas, a evolução das espécies, a gênese e as mutações das normas que interferem nos comportamentos sociais (Prigogine; Stengers, 1991, p. 5).

Creio que as citações acima dispostas em sequência formam um conjunto coerente e em sintonia com a minha maneira de abordar o processo desta pesquisa ao longo desses anos em que ela vem ocorrendo. Além disso mantive em mente as discussões de Thomas Kuhn (2011) relativas às conexões entre arte e ciência. O quanto de estético existe nas teorias científicas de uma época? O quanto de científico pode haver no fazer artístico? Estas perguntas são

enfrentadas também nesta pesquisa realizada dentro da área de artes e envolvendo processos tecnológicos, fazendo uso de teorias e máquinas elétricas fruto do progresso científico.

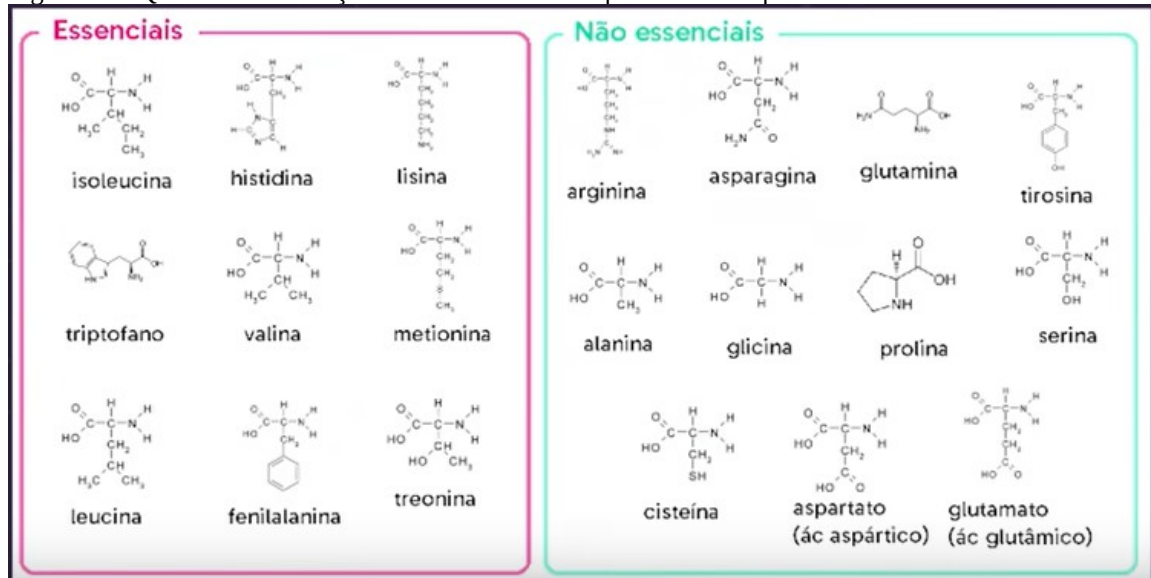
Contudo uma ênfase exclusiva nesse paralelos encobre uma diferença vital. O que quer que signifique o termo “estética” o objetivo do artista é a produção de objetos estéticos; os enigmas técnicos são o que ele tem que resolver a fim de produzir estes objetos. Para o cientista ao contrário os enigmas técnicas resolvidos são o objetivo e a estética é um instrumento para sua consecução. (...) Enfatizamos, ainda, o fato de que o cientista, a semelhança do artista, é orientado por considerações estéticas e guiado por modos estabelecidos de percepção (Kuhn, 2011, p. 364).

Seguindo com a parte teórica que surge das práticas criativas, houve um momento decisivo durante o desenvolvimento dos protótipos do ModoriTuk em que eu cheguei a um conjunto de peças que pareciam formar uma proteína. O aspecto modular das proteínas sempre me fascinou. As proteínas são compostas de aminoácidos e existem muitas dezenas de aminoácidos, mas só vinte deles constroem não apenas o corpo humano, mas todas as formas vivas na Terra. Deste livro de biologia traduzi do original e trago o seguinte trecho:

Os monômeros das proteínas, os aminoácidos, são bastante diferentes dos do DNA e do RNA, e existem 20 tipos em vez de 4. Cada aminoácido é construído em torno da mesma estrutura central através da qual pode ser ligado de forma padronizada a qualquer outro aminoácido do conjunto; ligado a este núcleo está um grupo lateral que confere a cada aminoácido um caráter químico distinto (Alberts *et al.* 2015. p. 6).

Os aminoácidos funcionam como um pequeno alfabeto para a composição das formas vivas, um sistema de criação de formas tridimensionais que pode ser usado para compor formas, com seus ângulos variando de módulo a módulo e desenhando no espaço suspenso pelo fluido dos corpos vivos. E também o DNA e RNA são outro sistema de composição tridimensional: feitos por um alfabeto de cinco letras, cada uma com potencial para se conectar a outras e assim, de baixo pra cima e a partir de suas conexões, criam-se as formas que permitem os encaixes no maquinário que mantém a vida funcionando. As regras bioquímicas de combinação criam a forma: locais positivos atraem locais negativos e a forma naturalmente se dobra criando a estrutura prevista e determinando os locais de encaixe com as outras proteínas.

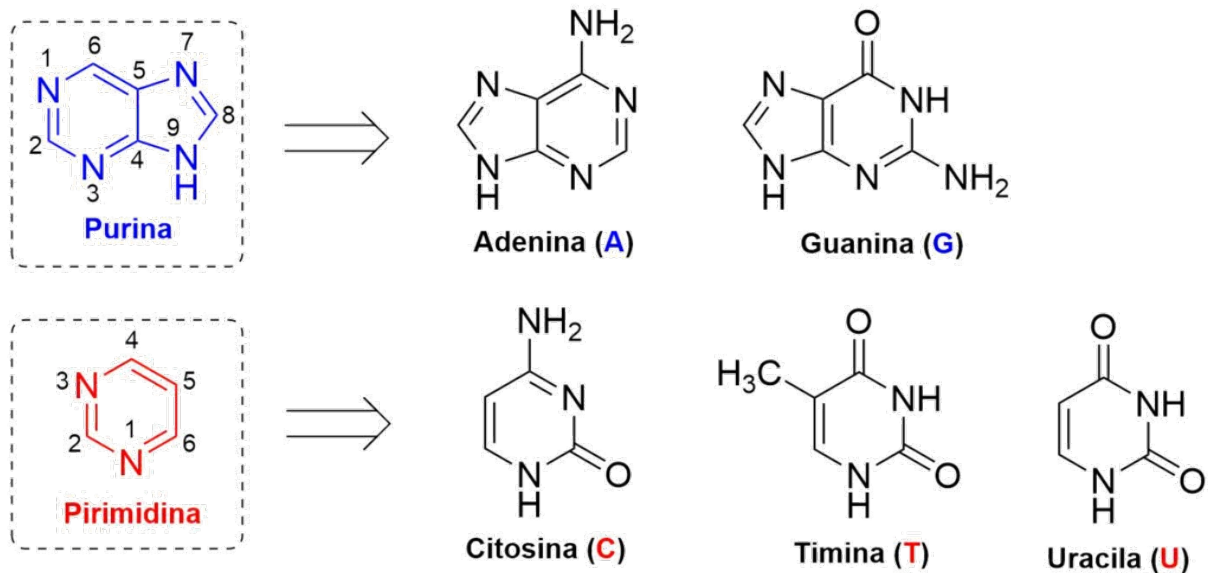
Figura 2 — Quadro com a relação dos 20 aminoácidos que formam as proteínas necessárias aos seres vivos



Fonte: Registro do autor de *frame* no canal de Youtube Nunca Vi 1 Cientista (Para [...], 2024).

Então temos vinte aminoácidos (Figura 2) que compõem as proteínas, unidades fundamentais dos seres vivos. Além disso o DNA e o RNA que também são fundamentais para a existência dos seres vivos, são compostos por 5 bases nitrogenadas (Figura 3) sendo cada uma delas também modular, composta de 4 elementos: carbono, hidrogênio, nitrogênio, oxigênio.

Figura 3 — Quadro com a relação das 5 bases nitrogenadas



Fonte: Bases [...] (2023).

Se seguirmos perseguindo a modularidade para dentro de cada átomo, iremos encontrar os núcleons (prótons e nêutrons) e dentro deles os quarks Up e Down. Seguindo na

modularidade das formas da natureza para dentro de cada quark, ainda encontramos glúons tricolores trocando partículas virtuais e mantendo tudo unido dentro de cada núcleo de cada átomo. Esse é um pequeno pedaço do Modelo Padrão da Física, a teoria mais avançada de como a matéria e a energia se organizam na natureza¹⁵.

Enxergar a modularidade na natureza é também visualizar um grande sistema de composição de formas que vai se montando do pequeno para o grande, camada a camada. A apreciação desta modularidade, seja partindo dos glúons até os organismos vivos ou vice-versa, decompondo cada parte de uma forma viva até os seus módulos energéticos, me causou uma epifania e essa apreciação me veio como uma revelação. Neste momento da pesquisa, o ModoriTuk já estava criado e eu pude enxergar o meu sistema original de criação de formas articuladas como um modelo universal que poderia ser facilmente adaptado para a visualização desta modularidade na natureza e usado como material pedagógico.

A apreciação deste conjunto de conhecimentos é uma das poéticas disponíveis na contemporaneidade. Ser capaz de apreciar o maquinário gerador de formas da natureza de um ponto de vista estético, ou seja, fazendo algum sentido do que acontece no mundo a partir da contemplação é uma qualidade em si mesma.

Ainda neste manual de funcionamento da célula de Alberts *et al.* (2015, p. 8), também encontrei a descrição de uma célula como um sistema dinâmico operando longe do equilíbrio químico, um espaço demarcado e que define interior e exterior, mas que mantém um fluxo constante entre ambos. No interior estruturas lineares, as proteínas se dobram e criam formas tridimensionais com ligações e com espaços vazios, esperando para serem conectados. No exterior há energia “energia livre”, que precisa ser capturada pela célula de alguma forma para que ela se mantenha viva. Caso não haja mais energia disponível no sistema, a célula morre. Este livro contém descrições dinâmicas do mecanismo celular e sua imagem é de um lugar onde a energia térmica do sistema, o fluido que mantém tudo se mexendo conforme o organismo vive, e as pequenas deformações das cadeias de módulos precisam capturar seu local de encaixe dentro do sistema, seja para ligar ou desligar processos, para crescer, digerir, se mover, etc. As células imersas em um enxame de objetos envolvidos por energia térmica, chocando-se uns aos outros e trocando energia entre si, criando e descrendo formas que estão na base da vida, dentro das células e entre elas.

¹⁵ Conforme vídeo do divulgador científico Arvin Ash (2025).

Uma célula viva é um sistema químico dinâmico, que funciona longe do equilíbrio químico. Para que uma célula cresça ou crie uma nova célula à sua imagem, é necessário que absorva energia livre do meio ambiente, bem como matérias-primas, para desencadear as reações de síntese necessárias. Este consumo de energia livre é fundamental para a vida. Quando para, a célula degrada-se em direção ao equilíbrio químico e morre rapidamente (Alberts *et al.*, 2015. p. 8, tradução nossa).

Assumo aqui também no caminho da pesquisa sobre uma matéria programável a influência de todo o imaginário da cultura pop — como o robzinho japonês superpoderoso e pacifista, o *Astroboy*; o desenho animado francês *Barbapapas*; os norte-americanos *Transformers* e o ciborgue *T-1000* do filme *O Exterminador do Futuro 2*, etc. Afinal, apesar de todos os conhecimentos científicos e tecnológicos envolvidos nesta pesquisa, ela ainda é uma tese em artes.

A matéria que se transforma conforme a vontade é um sonho antigo da humanidade. Deste sonho saíram guarda-chuvas, cadeiras de praia, mesas dobráveis, etc. No entanto, é preciso deixar claro que esta pesquisa não se aprofundou em nenhuma destas vertentes, descortinando apenas um panorama que, na verdade, é um pequeno recorte do que vem sendo pensado e criado pela humanidade dentro do tema de uma matéria que muda de forma.

Em resumo: foram múltiplas e variadas as fontes que alimentaram esta pesquisa, tanto no aspecto teórico quanto nas suas práticas de criação. Meu método principal foi, portanto, essa deriva informada que efetivamente atravessou de uma referência a outra, uma fonte teórica a outra sem que uma estrutura firme estivesse mantendo um rumo ou orientação única. Talvez também por isso este texto tenha demorado tanto tempo para ser concluído. Infelizmente, para realizar a pesquisa de outro modo, seria necessário outro pesquisador. O texto aqui apresentado foi o texto possível de ser realizado.

O caminho da pesquisa científica de um processo criativo está ligado ao relato fiel deste processo. Ao invés de tentar fazer caber a pesquisa realizada em uma teoria ou narrativa preestabelecida, me propus nesta tese a realizar a descrição fiel do meu encontro com as teorias e conceitos conforme eles surgiram no caminho da pesquisa. Portanto, a pesquisa teórica começa perseguindo as fontes do conceito de programação da matéria e seu duplo, matéria programável. Descobri que não havia uma definição única e universal para este conceito e portanto inventei uma: “matéria programável é a matéria que muda de forma para realizar alguma função.” Perseguindo aplicações desta definição tão potente quanto vaga, cheguei a alguns teóricos e artistas, e isso é abordado no Capítulo 3. Seguindo neste levantamento percebi

que, para criar alguma manifestação de uma matéria programável, eu precisaria fazer uso de um outro conceito relacionado, o conceito de modelo mental.

2.2 A prática do desenvolvimento criativo

O início da pesquisa prática que segui foi a criação de um material pedagógico para uma de minhas aulas no SESC, uma mosca modular (Seda, 2020). Para produzir um material pedagógico que fosse versátil a ponto de ser adaptado pelos alunos, criei um modelo mental de um inseto e a partir desse modelo, desenvolvi um sistema próprio de encaixes cuja posição de cada peça poderia ser alterada sem sua desconexão. Lembrando das aulas do segundo grau¹⁶, um inseto é um artrópode com seis pernas articuladas. A partir desta definição genérica, mas correta, imaginei um corpo universal em que seis pernas poderiam ser encaixadas, permitindo os seus movimentos a partir de uma operação manual. Imaginei um sistema de pinos e furos e desenhei do zero um modelo virtual tridimensional usando o software Blender. Fiz alguns testes de impressão usando, ainda, as impressoras GTMAX presentes no Espaço de Tecnologias e Artes do SESC Avenida Paulista, onde o curso aconteceria.

Mas este caminho foi interrompido e afinal o caminho da criação do ModoriTuk foi impreciso e errático por algum tempo. O fato é que esta pesquisa prática coincidiu com a pandemia de SARS-Cov-2 e a atravessou com todas as consequências que isso pode significar: perdas, angústias e incertezas pessoais e coletivas reverberaram dentro do processo. Faltando algumas aulas, o curso em que a mosca modular estava sendo usada como material pedagógico foi interrompido pela pandemia. Nesse momento, toda a pesquisa prática foi interrompida junto com o curso e só foi plenamente retomada cerca de cinco meses depois, quando eu, ainda trabalhando e estudando em *home-office* adquiri uma impressora 3D própria.

2.3 Códigos abertos

Nos aspectos práticos desta pesquisa, eu também busquei a produção e a difusão de conhecimentos via código aberto. Minha linha de pesquisa é herdeira ao mesmo tempo do movimento do Software Livre, iniciado em 1982, e do sistema Yoshizawa-Harbin-Randlett, a notação para o origami criada por Akira Yoshizawa na década de 50 e aperfeiçoada desde então. Mas esta pesquisa segue uma linha própria de produção de conhecimentos abertos que está mais

¹⁶ Como este momento escolar era chamado na década de 80 quando o percorri.

relacionada às comunidades hackers e à difusão de projetos, técnicas e métodos ligados aos movimentos de hardware aberto como os projetos *RepRap* e *Precious Plastic*¹⁷.

A ideia de operar e desenvolver abrindo e compartilhando os códigos fontes dos programas de computador surge dentro da comunidade pioneira de usuários de computadores ainda na década de 70, ganhando força a partir do desenvolvimento do GNU/Linux, um sistema operacional estável criado na década de 90 e cujo desenvolvimento contínuo passa por uma imensa comunidade que tem como prática o compartilhamento de informações e projetos.

Para além do compartilhamento de códigos de programas, esta pesquisa prefere o conceito de código aberto pois é um conceito que funciona também para qualquer outro tipo de compartilhamento de projetos, muito além dos *softwares*. Esta pesquisa fez amplo uso desta prática sempre que possível. Além de utilizar os projetos disponibilizados em código aberto, esta pesquisa fez uso de práticas que vão muito além do acesso de meros conteúdos técnicos. Operando num contexto de educação, em minha atuação como educador do SESC São Paulo, o uso de códigos abertos é essencial para aproximar o público das práticas que proponho em aulas nesta atuação profissional.

Acredito que este procedimento tanto de acesso quanto ao compartilhamento desse tipo de conteúdo foi e segue sendo uma necessidade básica das minhas pesquisas. Dentro desta pesquisa o principal método de acesso aos materiais foram os bancos de informações digitais: referências em artigos, bibliotecas, repositórios e vídeos. Tanto os modelos de *karakuri* quanto os softwares e tutoriais sobre o funcionamento das máquinas CNC estão disponíveis online, compartilhados em código aberto, seja em forma de manuais ou tutoriais ou compartilhados através dos muitos bancos de dados disponíveis livremente, como no *Github*, *Thingiverse* ou *Internet Archive*.

Para melhor realizar esta pesquisa, me aproximei do universo da fabricação digital. Pude integrar na pesquisa os conhecimentos obtidos sobre o funcionamento e a operação de máquinas de impressão em 3D e das cortadoras CNC Router e Laser. Da parte do software, essa linha de pesquisa me levou também a estudar e a aprender modelagem 3D e sistemas CAD — tipos de programas que já são extremamente difundidos e bem-sucedidos dentro das propostas de software livre. Estes estudos são abordados com detalhes no capítulo 3, que trata da matéria programável e da criação do ModoriTuk.

¹⁷ *RepRap* e *Precious Plastic* são dois projetos de máquinas abertas que podem ser reproduzidas e aprimoradas livremente. Disponíveis em: <https://reprap.org/wiki/RepRap> e <https://www.preciousplastic.com/>. Acessos em: 3 de outubro de 2025.

3 MODELOS MENTAIS

3.1 A descoberta de um conceito

No decorrer da pesquisa, acabei por fazer uso desse conceito de modelo mental em alguns textos que desenvolvi para apresentação em eventos acadêmicos. A ideia de um modelo mental me parecia tão natural em minhas descrições dos processos criativos desenvolvidos nesta pesquisa — e este conceito me surgiu de forma tão orgânica em minhas descrições teóricas — que quando a minha orientadora questionou sobre uma definição prévia eu percebi, um tanto surpreso, que não conseguia definir a sua origem.

3.2 Mapas cerebrais

Em busca do mapeamento desta influência e por sugestão de minha orientadora, retomei e concluí a leitura do livro *Self Comes to Mind*, do neurocientista português Antônio Damásio (2010). Damásio é uma autoridade contemporânea na busca pelas bases fisiológicas da consciência. Neste tratado, Damásio (2010) descreve detalhadamente a formação da consciência humana a partir das inúmeras camadas integradas que formam o sistema nervoso. O autor parte dos sentidos e começa pelo primeiro sentido de todos, a interocepção, que é o sentido difuso que integra em tempo real as percepções dos próprios órgãos que formam o corpo e dão ao cérebro a noção inicial de um conjunto coeso, integrado e, de um modo ideal, indissolúvel. O tratado de Damásio (2010) é amplamente corroborado pelas pesquisas mais recentes na área. Em seguida acontece a propriocepção, nosso sentido de separação em relação aos outros corpos. Damásio (2010) prossegue com uma descrição precisa de todas as camadas de informações que convergem através dos nervos para o cérebro e como estas camadas vão sendo organizadas em centros de distribuição dentro das estruturas cerebrais. A partir destas camadas de convergências de caminhos neuronais dispersos pelo corpo, Damásio chega ao conceito de “mapas cerebrais”. Os mapas cerebrais são mapeamentos do mundo objetivo realizados de um modo primoroso e dinâmico pelo cérebro, que são gravados e executados em sistemas neuronais distribuídos pelo corpo inteiro e conectados a redes de neurônios. Abaixo o conceito explicitado pelo autor, aqui em tradução minha:

As mentes surgem quando a atividade de pequenos circuitos é organizada em grandes redes de forma a compor padrões momentâneos. Os padrões representam coisas e acontecimentos localizados fora do cérebro, no corpo ou no mundo exterior, mas alguns padrões representam também o processamento de outros padrões pelo próprio cérebro. O termo mapa aplica-se a todos estes padrões de representação, alguns dos quais são grosseiros, enquanto outros são muito refinados, alguns concretos, outros abstratos. Em resumo, o cérebro mapeia o mundo à sua volta e mapeia os seus próprios atos. Esses mapas são experienciados como imagens nas nossas mentes, e o termo imagem não se refere apenas ao tipo visual, mas a imagens de qualquer origem sensorial, como auditiva, visceral, tátil, etc. (Damásio, 2010, p. 24).

Os mapas cerebrais podem ser estáveis ou bastante dinâmicos, a depender do contexto em que o organismo se encontra inserido. Os mapas mentais podem combinar aspectos geográficos, físicos, linguísticos e sociais. Podem descrever locais, contextos, possibilidades de ações, etc. Mas, até onde fui capaz de seguir, os mapas cerebrais não correspondem ao conceito de modelo mental do modo como eu estou concebendo e que me ajudou a criar o sistema de cuja descrição consiste esta tese.

A alta tecnologia tem propiciado capturar informações com pormenores significativos sobre as áreas do cérebro que são ativadas conforme o estímulo fornecido. Todavia, tais informações, de ordem fisiológica, não são isoladamente competentes para mostrar O QUE são e COMO são construídos os pensamentos, os sentimentos, as emoções e, conseqüentemente, a percepção do mundo. A Ciência entende uma larga parte do “ONDE” isto se dá (Leote, 2015, p. 27)¹⁸.

Como bem aponta Damásio (2010), não existem imagens fotográficas na nossa mente. Nem há um lugar no cérebro onde essas imagens podem ser armazenadas da forma como se concebe armazenamento.

Não existe uma pequena estrutura de dados no nosso cérebro que registre a natureza de uma cadeira como uma plataforma horizontal com vários postes verticais e um encosto vertical opcional. Em vez disso, os nossos muitos milhares de experiências com cadeiras são representados de forma difusa nas nossas próprias redes neuronais. Não somos capazes de recordar todas as experiências que tivemos com uma cadeira, mas cada encontro deixou a sua impressão no padrão de força das ligações neuronais, que reflete o nosso conhecimento das cadeiras. Do mesmo modo, não existe um local específico no nosso cérebro onde o rosto de um amigo esteja armazenado. É recordado como um padrão distribuído de forças sinápticas (Kurzweill, 2000, p. 83).

Uma varredura interna checka os códigos das memórias relativas ao fenômeno e reorganiza as informações, gerando um novo mapa mental, de curta validade, a validade da experiência/fenômeno em questão.

¹⁸ Aqui não há o conceito de separação entre cérebro e corpo. Uso o conceito na acepção de Damásio (2010, p. 61), para quem o cérebro é parte de um organismo integrado, vivo e complexo.

3.3 Mapeando as influências

Para não precisar reinventar algo que provavelmente já existia — e com objetivo de encontrar uma definição prévia e funcional dentro desta pesquisa — segui com a busca de um conceito de modelo mental. E nesta busca encontrei um pequeno universo de possibilidades sem, no entanto, procurar esgotar a questão. Acredito mesmo que a procura pelo histórico e pela diversidade de definições deste conceito, modelo mental, poderia ser o tema de pesquisas futuras, não necessariamente deste pesquisador.

Antes de me atentar para a imprecisão do termo, eu usava a ideia de modelo mental como um andaime, uma estrutura mental imaginária para auxiliar na construção de estrutura no mundo físico. Minha pesquisa de doutorado, aqui descrita, consiste na produção de um sistema de criação de formas — e também na descrição deste processo de produção. Para realizar a criação física de um sistema, ele foi sendo concebido parcialmente na forma de um modelo imaginário. A este modelo imaginário eu denominei modelo mental. Para descrever este processo de criação, eu preciso fazer uso destas imagens mentais articuladas, pois elas estabelecem as propriedades de cada parte deste sistema de criação e as regras para a articulação destas partes.

Assim, o modelo mental do sistema em desenvolvimento me auxiliava na criação de suas diversas partes. Este uso livre do conceito de modelo mental era feito por mim de modo inocente, sem necessidade de definições, como se o conceito tivesse amplo reconhecimento e fosse de uso geral e tácito. A partir do momento em que percebi que me faltava uma definição, comecei a buscar a origem deste conceito.

3.3.1 Freud e as associações inconscientes

Iniciei a busca pelo rastreamento de sua origem: de onde poderia ter surgido para mim a ideia de modelo mental? Meu primeiro suspeito foi Freud. A leitura precoce do já citado *A Interpretação dos Sonhos* na adolescência formou minha visão de mundo tanto em relação à aceitação do inconsciente como parte integrante da mente quanto em relação à estrutura em rede ramificada que sintetiza camadas e cria os símbolos a serem usados durante os sonhos. Este processo de condensação dos símbolos do inconsciente me fascinou desde então.

O caminho da associação leva de um elemento do sonho para vários pensamentos oníricos; e de um pensamento onírico para vários elementos do sonho. [...] Não importa que sonho eu submeta a uma dissecação semelhante, sempre se confirmam os mesmos princípios, isto é, de que os elementos do sonho são formados a partir de toda a massa de pensamentos oníricos e cada um deles parece ser multiplamente determinado em relação aos pensamentos oníricos (Freud, 1987, p. 375–376).

Durante a descrição deste processo de descoberta do inconsciente, Freud (1987) poderia ter definido também o conceito de modelo mental. Porém uma busca pelo termo dentro das 751 páginas da *Interpretação dos Sonhos* não retorna nenhum resultado. Então, se algo parecido for definido no livro, Freud (1987) faz uso de algum outro termo. Com grande parte da pesquisa já realizada e pouco tempo para concluir o texto final enquanto concluo a lenta releitura do livro fundamental de Freud (1987), optei por buscar algumas definições contemporâneas do conceito e acrescentar a elas a definição intuitiva que me vi levado a desenvolver para esta tese.

3.4 Os experimentos mentais da ciência

Assim, esta pesquisa irá se contentar com algumas definições parciais da ideia de modelo mental que me servem neste contexto. Ainda buscando a origem do termo modelo mental dentro de meu processo criativo depois de Freud (1987), outro provável suspeito pela sugestão do termo veio do universo da divulgação científica. A divulgação científica é um ramo de atuação do qual sou adepto tanto no consumo de livros, artigos e vídeos quanto no meu trabalho como pesquisador e educador. A necessidade que a ciência tem de criar imagens ou situações que a ajudem a difundir certos conceitos novos e de difícil compreensão a leva a gerar modelos mentais de situações imaginárias. Estes modelos, pequenas alegorias, ajudam na difusão de conceitos difíceis como a velocidade da luz sendo uma constante universal ou a dualidade partícula-onda.

No livro capítulo 10 de seu livro *A Tensão Essencial*, o influente filósofo da ciência Thomas Kuhn (2011) descreve alguns destes experimentos mentais que mantém alguma semelhança com o que estou chamando de modelos mentais:

Os principais problemas gerados pelo estudo dos experimentos mentais podem ser formulados como uma série de questões. Em primeiro lugar, visto que a situação imaginada num experimento mental não pode, evidentemente, ser arbitrária, a que condições de verossimilhança ela está sujeita? [...] Se estivéssemos lidando com um experimento mental real, os dados empíricos sobre os quais ele se baseia seriam bem

conhecidos e amplamente aceitos antes de o próprio experimento ser ao menos concebido (Kuhn, 2011, p. 258).

E também:

Um experimento mental, não é uma compreensão da natureza, e sim do aparato conceitual do cientista. [...] Também não é necessário que a situação imaginada exista de fato na natureza. Reciprocamente, o experimento mental cujo único propósito é eliminar a confusão está sujeito a apenas uma condição de verossimilhança: a situação imaginada deve ser tal que o cientista possa aplicar seus conceitos do modo como normalmente os empregou antes (Kuhn, 2011, p. 259).

O conceito de experimento mental descrito aqui por Kuhn (2011) se aproxima bastante do conceito de modelo mental, mas ainda não é exatamente a mesma coisa. O conceito que eu proponho é um pouco mais livre e será definido com mais precisão ao final deste capítulo.

3.4.1 Carl Sagan e o modelo mental

Por ora acredito ser suficiente atribuir a aparição deste conceito em minha consciência à influência da divulgação científica e seus experimentos mentais. Tendo crescido entre os anos 70 e 80 gozei a influência do *Cosmos* de Carl Sagan nas manhãs de domingo na Rede Globo. Em uma busca recente encontrei e traduzi o trecho seguinte a partir de seu livro *Cosmos*, que guiou a criação da série:

Há muito mais galáxias do que pessoas. Esta perspectiva é uma corajosa continuação da nossa propensão para construir e testar modelos mentais dos céus; o Sol como uma pedra em brasa, as estrelas como chamas celestiais, a Galáxia como a espinha dorsal da noite (Sagan, 1982, p. 191).

Portanto para o âmbito desta pesquisa atribuo a expressão “modelo mental” à influência perene de Carl Sagan em minha formação. Sigo, no entanto, mapeando e descrevendo as demais fontes que me serviram de influência durante esta pesquisa cujo processo criativo descrevo aqui.

3.4.2 Os modelos mentais na divulgação científica

O tema da matéria programável será abordado com mais profundidade no próximo capítulo, mas adianto que durante as minhas investigações sobre este conceito esbarrei em áreas complexas e de difícil compreensão como as teorias envolvidas na física quântica. Realizei

minha aproximação do tema a partir de diversos conteúdos de divulgação científica (devidamente listados entre minhas referências) e consegui formar algumas imagens ou, melhor, alguns modelos mentais dos processos complexos que ocorrem na intimidade da matéria e da energia neste universo conforme o conhecimento científico contemporâneo. Estes modelos foram uma das fontes essenciais neste processo criativo e me guiaram no desenvolvimento dos ModoriTuks, como já expliquei no capítulo anterior, no qual trato da metodologia. Descrevo a seguir alguns destes modelos.

3.4.3 O famoso modelo mental do gato

O físico Erwin Schrödinger é um dos cientistas mais importantes dentro da teoria quântica. Ele foi responsável pelo desenvolvimento de uma equação que segue sendo fundamental para as investigações na área. A equação de Schrödinger é uma ferramenta matemática de difícil compreensão para o público leigo dentro do qual me incluo. De um modo geral ela descreve a evolução de uma onda através do tempo. Na física quântica, os componentes da matéria e da energia podem ser descritos tanto como partículas, ou seja, unidades separadas, quanto como ondas ou processos contínuos que se alteram conforme o tempo passa. Essa é uma das grandes dificuldades de comunicação enfrentadas por esta área da ciência: a realidade subatômica em si está inacessível, só pode ser descrita através de fórmulas complexas e só pode ser observada através de instrumentos. Estes instrumentos geram padrões que precisam ser interpretados de acordo com teorias amparadas por equações complexas. Além disso os instrumentos interferem no processo a ser observado e descrito, tornando tudo ainda mais confuso. A equação de Schrödinger foi um dos momentos decisivos no desenvolvimento de uma teoria quântica, mas um dos problemas que ela trouxe foi tornado famoso através de uma imagem, um modelo mental, criado por ele durante uma conferência. Fazendo uso da equação de Schrödinger, foi finalmente possível fazer previsões sobre o comportamento das partículas quânticas, mas ao mesmo tempo não é possível saber a posição e a velocidade de uma partícula ao mesmo tempo. Ou se mede a posição e a velocidade é desconhecida ou o oposto. Então, até ter sua posição medida, um fóton está potencialmente e ao mesmo tempo em todas as posições dentro de uma onda. Ou mais correto ainda seria dizer que a partícula fóton não existe até ser medida e ao invés de um fóton o que existe é apenas a onda. Para ilustrar este paradoxo e o desconforto que isto causou a ele, Schrödinger criou o famoso modelo mental do gato trancado

dentro de uma caixa junto com uma ampola de veneno e um elemento radioativo. Até abrir a caixa era impossível saber se o gato estava vivo e apesar do gato certamente estar vivo OU morto, era como se ele pudesse estar em um estado de sobreposição e estivesse vivo E morto ao mesmo tempo, o que é obviamente impossível. Ao contrário do que as pessoas tendem a achar, Schrödinger criou este modelo para expressar o seu desconforto com o sucesso de sua equação que criaria situações paradoxais a cada experimento. Até serem medidas, as partículas de um sistema quântico estariam sobrepostas em muitos possíveis locais ao mesmo tempo o que seria tão absurdo quanto o gato morto-e-vivo de seu modelo mental. O trecho seguinte, traduzido por mim de um artigo, explica essa situação:

Schrödinger inventou originalmente a imagem do gato como uma piada. Se os verdadeiros crentes da mecânica quântica têm razão quando afirmam que as incertezas do micromundo só se dissipam quando o observamos, Schrödinger considerou que isso também deve acontecer por vezes no macromundo, um absurdo que viola o senso comum. Num artigo publicado em 1935 na revista de língua alemã *Naturwissenschaften*, Schrödinger apresentou a sua famosa imagem do gato numa caixa para demonstrar o quão disparatada era esta noção (Crease, 2024).

O sucesso do modelo mental criado por Schrödinger, bem como os outros que serão aqui citados, mostra que a ciência usa este modo de transmitir imagens mentais complexas com bastante frequência e sucesso.

3.4.4 Outros modelos importantes

Mesmo antes do gato morto-e-vivo de Schrödinger se tornar popular já havia outros modelos bem sucedidos e extremamente populares dentro da comunicação científica, como a imagem do Sistema Solar e o modelo atômico de Bohr. Ambos são parte integrante do imaginário popular. No Sistema Solar da maneira como o concebemos atualmente, a Terra é parte de um sistema onde o Sol fica no centro e os planetas orbitam à sua volta, todos no mesmo plano. Uma estrutura parecida é proposta para o átomo, com o núcleo ficando ao centro e as camadas eletrônicas ao redor. Ambos os modelos são apenas aproximações que guardam semelhanças com a realidade, não são descrições exatas, mas ainda assim funcionam para transmitir uma imagem em movimento de algo. É uma imagem mental cujo estado pode se alterar e a mudança de estado é parte integrante do modelo. O modelo mental que hoje utilizamos de um Sistema Solar foi criado por Copérnico. É uma aproximação da verdade astronômica descoberta por ele através de observações e substituiu um modelo anterior que

havia sido criado por Aristóteles. O modelo de Aristóteles com a Terra ao centro e os astros percorrendo movimentos circulares à nossa volta foi extremamente popular e influente durante séculos e mesmo equivocado “explicava” o mundo de uma maneira eficiente e sintética. Foi posteriormente incorporado ao conhecimento medieval e se tornou parte dos dogmas cristãos na Europa. A importância destes modelos é tão significativa que ao desafiar a imagem mental que todos possuíam, Giordano Bruno foi queimado vivo. Modelo mental é algo de extrema importância e influência na cultura humana. Mas sendo uma tese em Artes, e especialmente em Procedimentos Artísticos, o conceito de modelo mental que me serve nesta pesquisa não é filosófico e sim pragmático. O modelo mental que aqui descrevo é uma estrutura mental que funcione para representar um sistema em que mudanças podem acontecer e serem previstas através do uso deste modelo. O modelo mental nas Artes é usado pelo artista para guiar a produção de obras que façam uso de conhecimentos científicos. Incorporando mudanças de estado no modelo, o artista consegue prever o comportamento da obra, aqui considerada como um sistema, em seus instantes sucessivos quando aplicadas as forças físicas sejam elétricas, mecânicas, gravitacionais, sonoras, etc. Apresentarei uma definição mais completa mais adiante.

Estes modelos mentais oriundos das áreas mais complexas da ciência mais avançada muito me serviram de inspiração em algumas etapas desta pesquisa. Os modelos mentais que representam teorias científicas se conectam a trechos de minha própria imaginação, pondo-os em movimento para, unidos, criarem alguma nova forma mental original que por fim irá gerar uma obra material.

3.5 Modelos mentais na arte tecnológica

Monica Tavares e Julio Plaza (1998) também fazem uso do termo modelos mentais exatamente quando descrevem a relação da criação artística que faz uso de conhecimentos científicos.

A apropriação, pelo artista, de esquemas representacionais de cunho científico constitui-se em recurso lícito e necessário, de caráter intertextual que, transposto para uma nova ordem (mesmo que seja desordem), servirá ao artista para pensar e elaborar as suas ideias e/ ou modelos mentais. Isso, porque o artista é sensível às aparências da representação científica, que é o lugar onde se instala a dimensão estética da ciência. [...] E Lotman (1981:28): “o artista usa os sistemas e métodos da ciência para apresentar algo novo no mundo, ao contrário da ciência que apenas descreve o

fenômeno, o artista materializa ideias através dos métodos científicos” (Tavares; Plaza, 1998, p. 7).

E ainda, mais adiante:

Lévi-Strauss (1976:37–55) nos ensina que “o artista tem, por sua vez, algo de cientista e de ‘bricoleur’. Distinguimos o homem de ciência e o bricoleur pelas funções inversas que, na ordem instrumental e final, conferem ao acontecimento e à estrutura, um criando acontecimentos (mudar o mundo) por meio de estruturas, e outro, estruturas por meio de acontecimentos”. É o percurso do artista ao inventar a sua poética de tal forma que, enquanto a obra se faz, inventa-se o modo de fazer (Tavares; Plaza, 1998, p. 9).

Durante a pesquisa realizada nestas encruzilhadas das artes tecnológicas, pude experimentar desde a criação mais pura advinda das associações e experimentações livres até a sistematização científica de certos procedimentos, e na passagem da criação para a realização dentro destes caminhos os modelos mentais me guiaram enquanto inventava a obra aqui descrita.

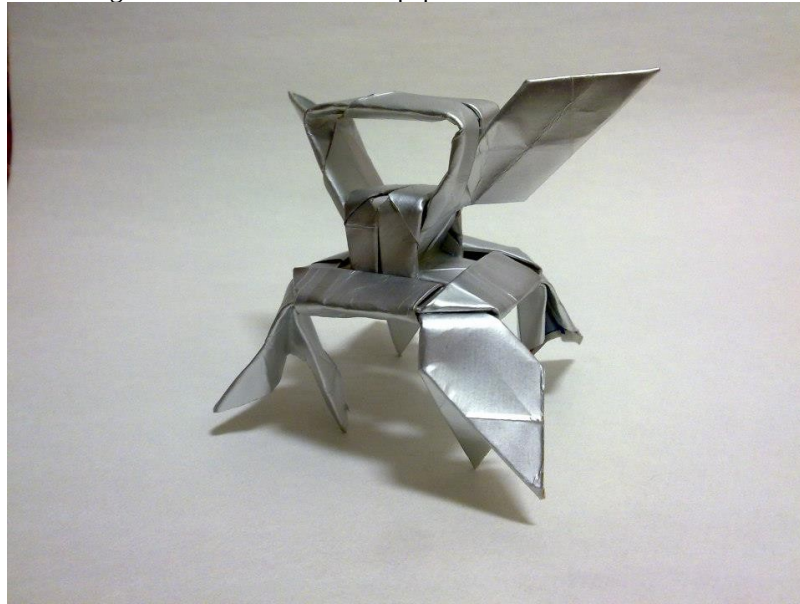
3.6 Modelo mental da criação do ModoriTuk

O conceito de modelo mental esteve presente em muitos momentos desta pesquisa influenciando de maneira consciente e inconsciente o desenvolvimento do ModoriTuk e por esta importância dedico todo este capítulo a apresentação das diversas maneiras pelas quais entrei em contato com as variações deste conceito. No entanto para que esta conexão com o processo criativo aqui descrito fique claro passo agora a descrever como modelos mentais específicos influenciaram aspectos importantes da criação do ModoriTuk.

O sistema modular ModoriTuk consiste em módulos que podem ser interconectados sem nenhuma ordem específica a partir de módulos com pinos e furos que se encaixam. A característica específica desse sistema é permitir que um conjunto de peças encaixadas mude de forma sem a desconexão dos módulos. Em 2019, quando primeiro me veio a ideia de um sistema modular ela veio inspirada pelos origamis modulares. Nas primeiras tentativas, os módulos seriam triângulos encaixados com dobradiças, simulando a técnica de origami modular. Origamis modulares são esculturas de papel feitas a partir da conexão de módulos dobrados com as técnicas do origami. Podem ser módulos iguais ou diferentes. Origamis modulares são formados a partir da combinação de encaixes nascida das características de cada módulo. Para

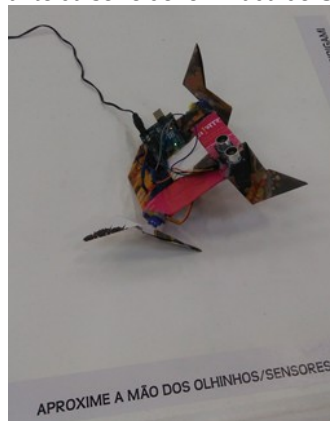
criar obras anteriores como os SedaToys (Figura 4) ou os OriBots (Figura 5) usei quatro módulos diferentes (Figura 6) que continham abas e bolsos encaixáveis entre si. A criação destas obras está descrita com detalhes em minha dissertação de mestrado, Origami e Robótica (Moraes, 2018).

Figura 4 — Fotografia de uma escultura de papel de Daniel Seda denominada de Sedatoy



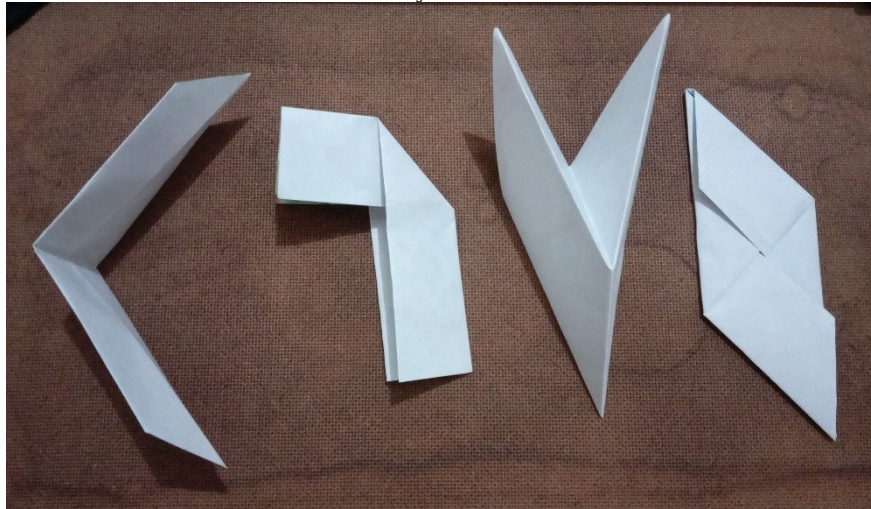
Fonte: Fotografia do autor, 2012.

Figura 5 — Fotografia do Sirigami, uma escultura robótica feita de papel de autoria de Daniel Seda. Obra integrante da série denominada de OriBots



Fonte: Fotografia do autor, 2018.

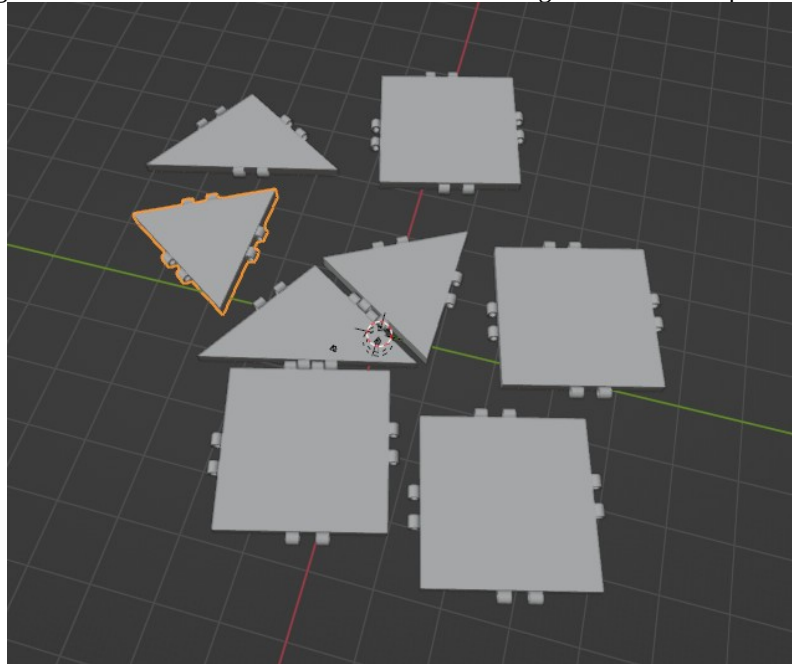
Figura 6 — Fotografia de quatro módulos de origami de origens diversas usadas por Daniel Seda na composição dos SedaToys e dos OriBots



Fonte: Fotografia do autor, 2018.

Neste momento da pesquisa que levou à criação dos ModoriTuks eu aplicava na prática um modelo mental que simulava a lógica dos origamis modulares. O que caracteriza um modelo mental é alguma verossimilhança com a realidade. Um modelo mental de um sistema de módulos pode ser imaginado livremente, mas tem que funcionar quando materializado em uma estrutura real. O modelo mental precisa conter detalhes como os encaixes, as mudanças de estado quando a estrutura for manipulada, etc. Para imaginar este sistema a ser impresso em 3D, parti mentalmente de um quadrado. Dividido numa diagonal, o quadrado se transforma em dois triângulos iguais com um ângulo de 90 graus e dois de 45. Imaginei também um módulo que fosse um triângulo equilátero. Pensei: como esses módulos poderiam ser articulados? Pondo uma conexão em cada lado os módulos poderiam se conectar com outros lados dos outros módulos. Como conectar de maneira que cada módulo seja facilmente desconectado e conectado em outra parte qualquer? E como fazer com que ao mesmo tempo os módulos fiquem bem encaixados o suficiente para não desfazerem a estrutura quando manipulada? Pensei em tubos nos lados de cada módulo com fios que atravessassem mantendo-os unidos e permitindo movimento. Completo o modelo mental, parti para a modelagem no Blender (Figura 7).

Figura 7 — Imagem do ambiente do software Blender com modelagem de módulos quadrados e triangulares



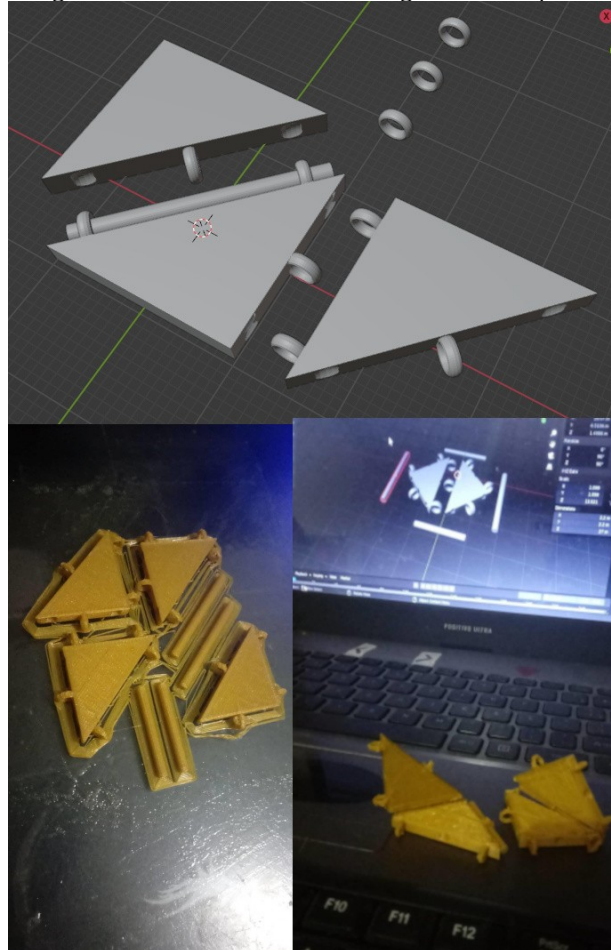
Fonte: Impressão da tela realizada pelo autor, 2019.

Depois de modelados, os módulos foram impressos com uma GTMAX 3D A1, uma das impressoras do SESC, a título de pesquisa. Muitas das pesquisas aleatórias que realizo durante o trabalho terminam por gerar atividades mais adiante, como cursos ou oficinas livres. Os testes realizados com os módulos impressos não foram bem sucedidos, a estrutura não tinha firmeza e as soluções encontradas por mim para fixar os fios não me satisfizeram. Frustrado, abandonei este caminho durante meses e só fui retomar essas tentativas de módulos inspirados em origami a partir de setembro de 2020. Já na pandemia, durante o período de isolamento, comprei uma impressora própria e voltei aos módulos triangulares do ponto em que tinha parado. Desta vez, em vez de fios, parti para a inserção de pinos entre os módulos, basicamente reinventando uma dobradiça comum, mas feita de plástico impresso em 3D. Estes módulos também não funcionaram. Neste momento eu ainda tinha pouca experiência em impressão 3D e as configurações que usei no plástico provavelmente não eram adequadas. Também o filamento testado neste momento, o PLA, não era o mais indicado para este projeto e os pinos quebravam quando postos entre os módulos, quando manipulados ou quando retirados. Só mais tarde fui descobrir os filamentos mais adequados para esta pesquisa: o PETG e o TPU. Ambos com características bem diferentes, mas duas semelhanças: elasticidade e resistência.

Ainda na tentativa de realizar um sistema impresso em 3D inspirado em origamis modulares, fiz diversas outras variações a partir do modelo mental de uma dobradiça. Nestas

tentativas alternei pinos e tubos entre os módulos, ora deixando um módulo só com pinos e outro com os tubos, ora combinando uns e outros (Figuras 8 e 9).

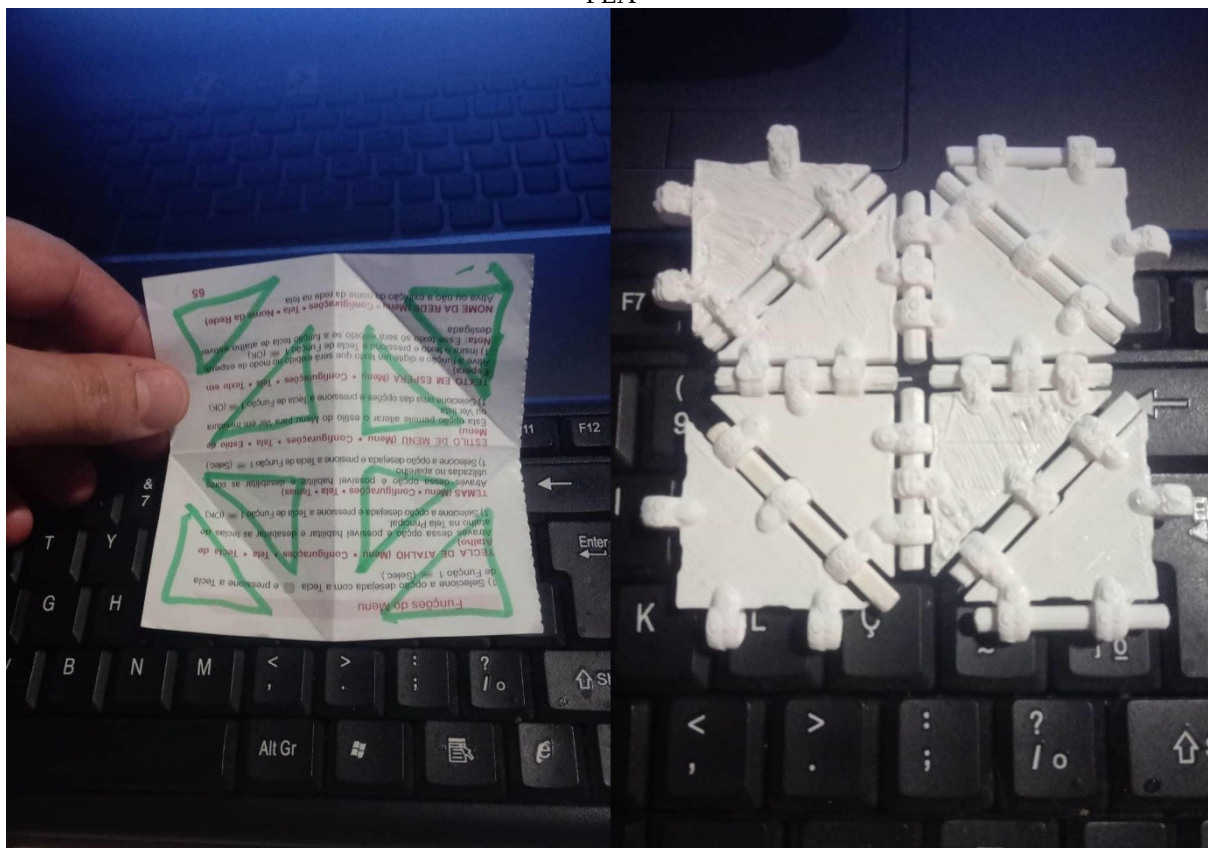
Figura 8 — Composição com registros da tela do software e fotografias da impressão feita em PLA



Fonte: Imagem do autor produzida com registro de tela e fotografias, 2020.

Testei com outras configurações e foram pelo menos 37 variações e tentativas de combinar pinos e tubos para criar módulos reconfiguráveis guiados por um modelo mental inspirado em origami modular. Muitos desses foram testados e, apesar de alguns terem funcionado (Figuras 7, 8, 9, 10, 11 e 12), eu não fiquei satisfeito nem com o resultado estético e nem com a estabilidade da estrutura. Depois de todos estes testes de modelagens e impressões, desisti destes módulos que não criavam estruturas muito estáveis e abandonei mais este caminho.

Figura 9 — Fotografias mostrando rascunho em papel e realização de protótipo em impressão 3D com filamento PLA



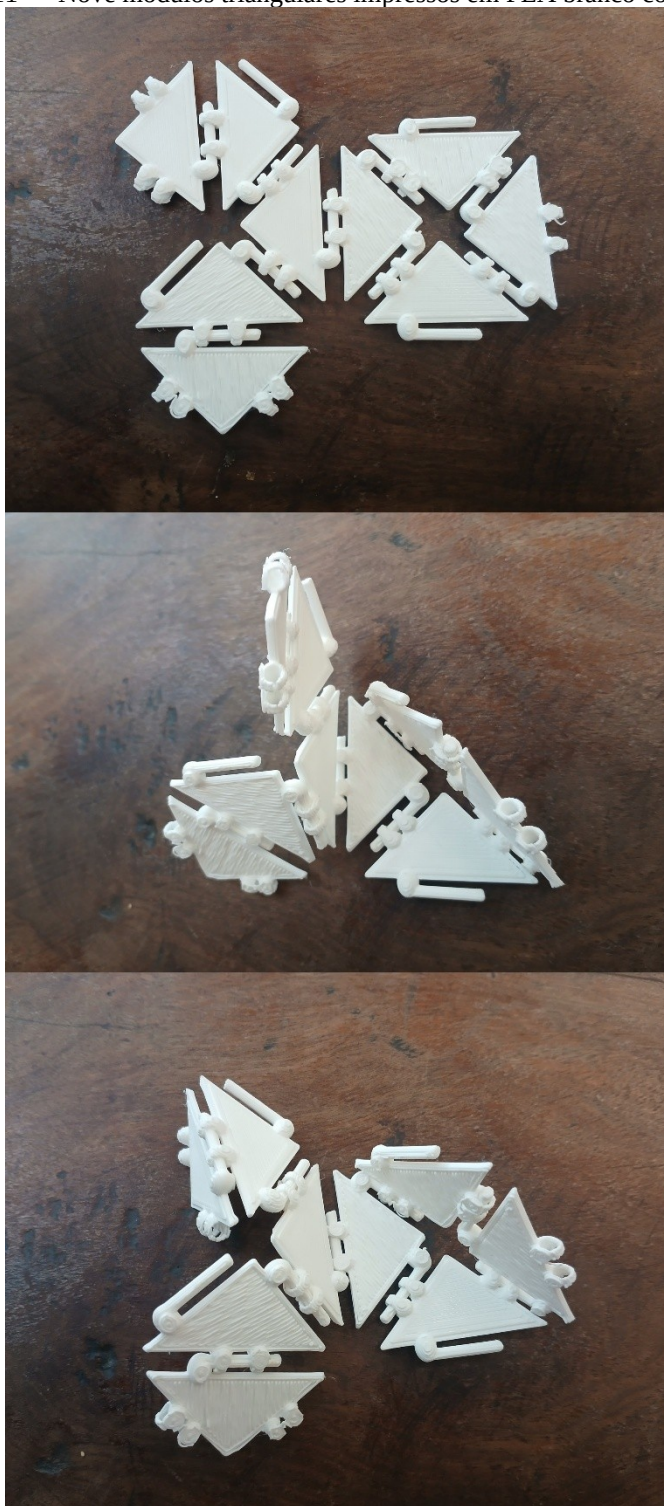
Fonte: Composição de fotografias do autor, 2020.

Figura 10 — Oito módulos triangulares impressos em PLA branco conectados



Fonte: Composição de fotografias do autor, 2025.

Figura 11 — Nove módulos triangulares impressos em PLA branco conectados



Fonte: Composição de fotografias do autor, 2025.

Figura 12 — Quatro módulos triangulares impressos em PLA branco conectados

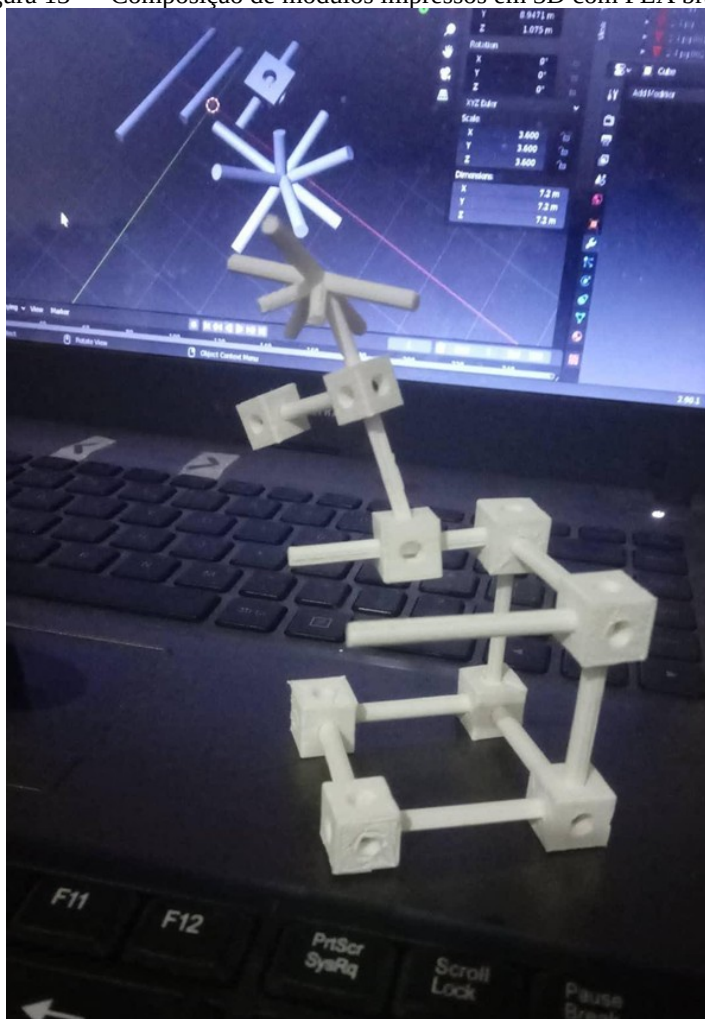


Fonte: Composição de fotografias do autor, 2025.

Ficou evidente pra mim que o novo modelo de sistema deveria necessariamente incluir as seguintes características: (1) estabilidade, (2) resistência, (3) facilidade de alteração de forma. Talvez pela frustração desses tantos testes, na tentativa seguinte evoquei outros modelos

mentais mais simples: os sólidos geométricos e as moléculas. Imaginei estruturas simples como cubos com furos em todos os lados e pinos conectando estes cubos. Imaginei um sistema que realizasse em parte o modelo descrito por Platão em *Timeu*: um universo de formas derivadas dos sólidos platônicos. E em paralelo a isso me veio também a ideia de átomos formando moléculas e pinos fazendo o papel dos elétrons trocados ou compartilhados nas ligações moleculares. Para isso parti de uma forma geométrica básica como o cubo. Com alguns cubos conectados, seria possível formar outras estruturas. Para uni-los pensei em cilindros. Os cubos também teriam furos em seus lados e os cilindros, na verdade pinos, se encaixariam, permitindo a criação de estruturas estáveis resolvendo o problema da tentativa anterior. Partindo das formas básicas presentes no próprio programa utilizado, o Blender, apenas criei pequenas variações como pôr furos nas laterais do cubo, esticar e afinar o cilindro. Mas depois de realizado este modelo a forma geral me pareceu apenas sem graça (Figura 13).

Figura 13 — Composição de módulos impressos em 3D com PLA branco



Fonte: Fotografia do autor, 2020.

Talvez técnica demais, simples e comum demais. E, apesar de parecer uma boa solução para a questão que eu havia proposto (uma estrutura que mudasse de forma), depois de impresso e montado não me satisfez enquanto criação artística. E este foi outro caminho abandonado após algumas modelagens e remodelagens, impressões e testes que considerei insatisfatórios.

Tudo isto aconteceu durante o isolamento da Pandemia de SARS-Cov-2, ainda sem perspectiva de vacina e em um cenário político e ambiental desesperador. Este processo desde a compra da impressora 3D, sua montagem e todos os testes que geraram o ModoriTuk aconteceram nesse estado de angústia e sem poder visitar minha família, quase sem encontrar amigos presencialmente e em um momento de grande tensão psicológica. Tudo isto contribuiu para uma nostalgia que me levou a momentaneamente abandonar o projeto de criar um sistema modular inspirado em origamis e parti para um desafio totalmente diferente: recriar o *Playmobil*, um dos brinquedos mais queridos da minha infância. Novamente, para que a relevância de tudo o que é dito aqui fique evidente reafirmo que esta tese acompanha, descreve e documenta um processo de criação artística com objetivo de reunir evidências que os conceitos de modelo mental e programação da matéria foram decisivos neste processo. Ora, o *Playmobil* é parte integrante do meu imaginário desde criança. Entrar em contato com estas pequenas figuras humanas em minha infância e poder ampliar sua potência de criação ao colocá-las em relação a outros elementos inventados por mim como prédios feitos de caixas de papelão empilhados e ruas feitas de livros foi decisivo para a criação futura do artista e pesquisador que eu sou. De modo que o ressurgimento desta memória nostálgica neste momento emocionalmente árido trouxe de volta o prazer de um momento de criação pura e inocente onde um boneco de plástico fazia surgir um mundo ao seu redor convertendo qualquer coisa à volta em parte do jogo e da brincadeira da criação. Descrevo na sequência a minha recriação deste boneco conectando este processo em seguida ao conceito de modelo mental.

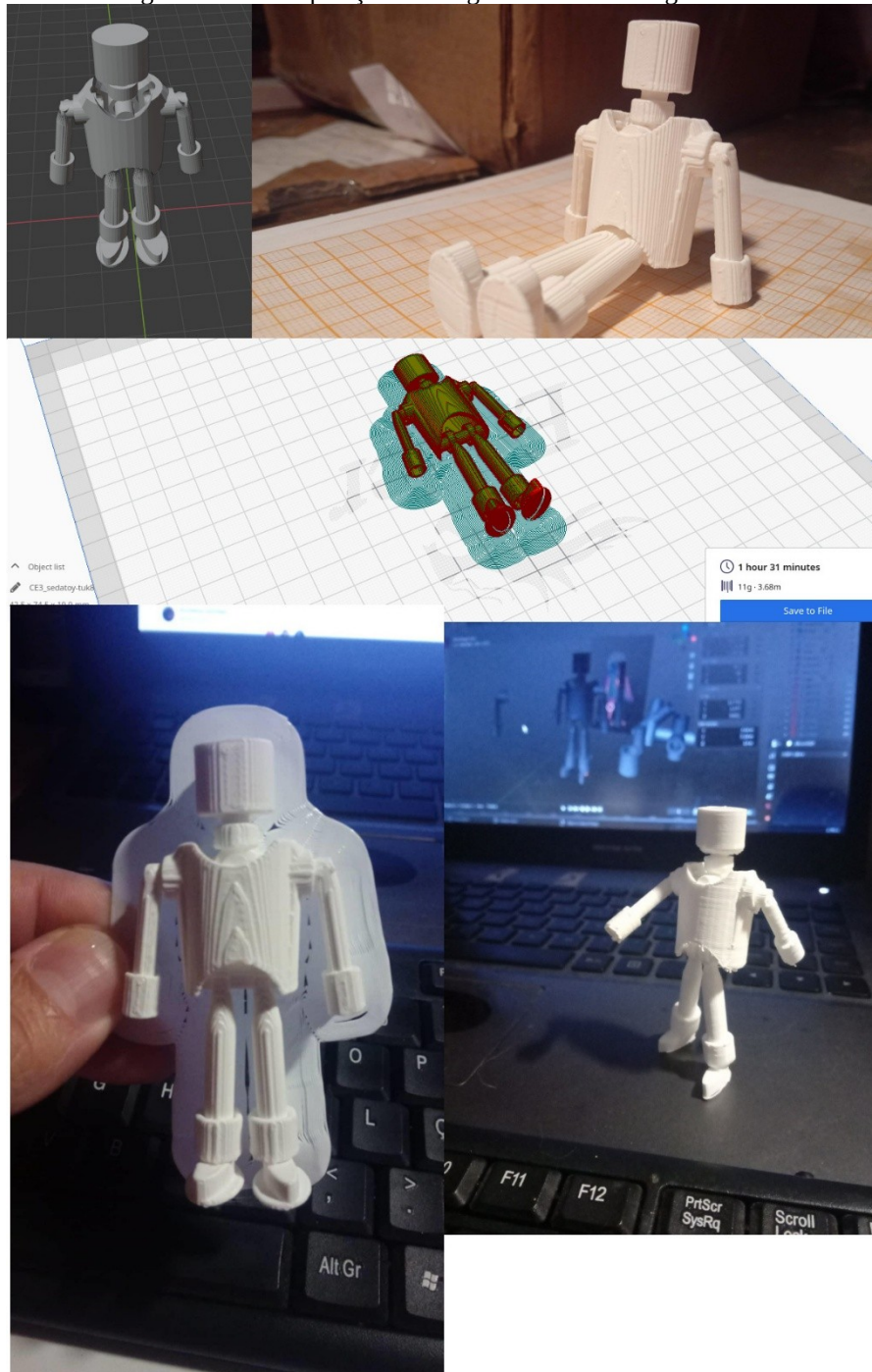
O desafio neste momento então passou a ser modelar e imprimir um boneco inspirado no *Playmobil*, porém original. Defini que o boneco deveria ser articulado e teria que ser impresso de uma única vez, ou seja, sem necessidade de montagem posterior de suas partes impressas. Inspirado por uma imagem genérica de *Playmobil* (Figura 14) encontrada na INTERNET, modelei um boneco no Blender partindo das formas geométricas básicas que o programa fornece.

Figura 14 — Composição de imagens de *Playmobil*

Fonte: Composição do autor, 2025

Em um processo intenso de poucos dias (Figura 15) consegui obter uma versão bastante satisfatória de um boneco com a cabeça, os braços e as pernas articulados e impresso de uma única vez.

Figura 15 — Composição de imagens do boneco original Tuk



Fonte: Composição do autor, 2020.

Animado por este sucesso após os fracassos das tentativas anteriores de sistemas modulares, resolvi alterar o boneco, permitindo que ele pudesse trocar de cabeça. Como inspiração usei uma imagem de quatro urnas funerárias egípcias (chamadas de jarros canópicos) com os deuses Hórus, Anúbis, Osíris e Thot (Figura 16).

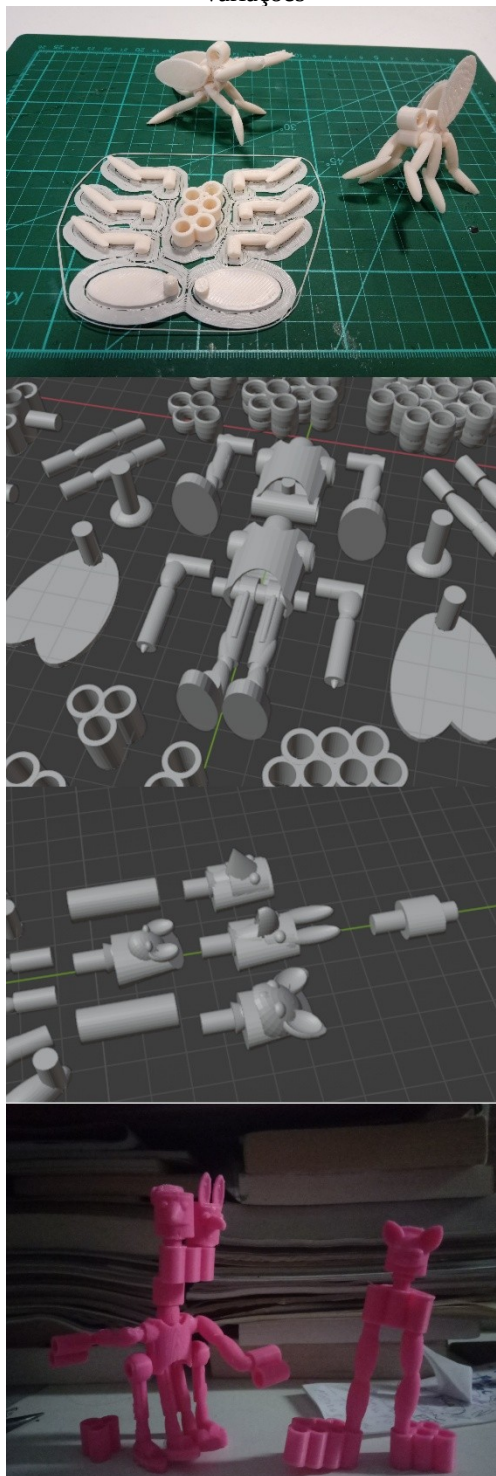
Figura 16 — Jarros canópicos representando deuses do Egito Antigo



Fonte: Canoptic [...] (664–525 a.C.).

Só então lembrei do projeto que havia iniciado no ano anterior de uma mosca modular para um curso a ser ministrado no SESC Avenida Paulista (Figura 17). No Capítulo 3 desta tese faço uma explicação mais detalhada de todo o processo, mas por ora destaco o fato de já ter criado um sistema bem sucedido de encaixes rotativos formados por pinos e tubos um ano antes e ter esquecido totalmente disso. Trouxe de volta as medidas do sistema original e, após criar uma série de cabeças para o Tuk, como chamei o boneco, resolvi desmembrar também os braços e torná-los modulares e depois fiz o mesmo com as pernas. Ao fazer isso tudo acabei por remodelar totalmente o boneco para adaptá-lo às medidas que haviam funcionado na mosca modular.

Figura 17 — Composição de fotografias mostrando os modelos da Mosca Modular e do boneco Tuk com suas variações

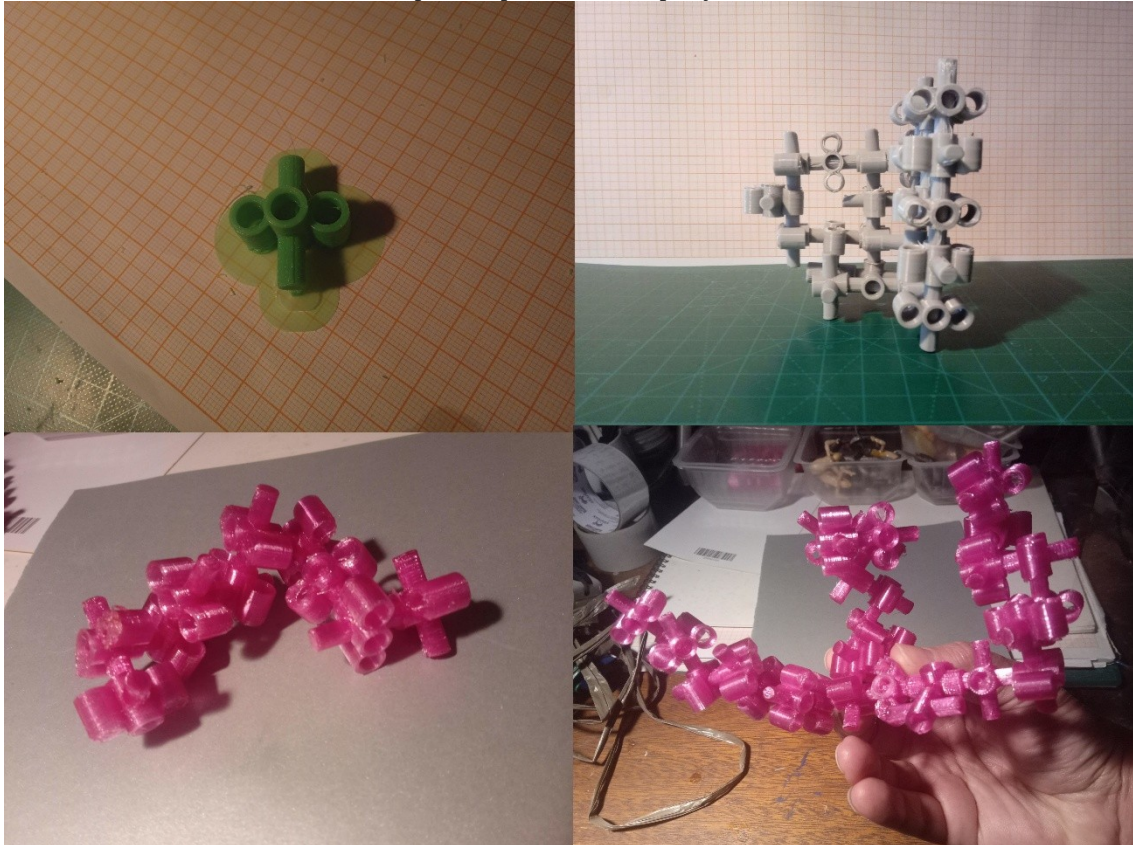


Fonte: Fotografias do autor tiradas entre 2020 e 2021.

Depois de mais algumas experiências, finalmente tirei o boneco do centro do sistema ao criar um módulo que considerei potente o bastante para criar formas complexas a partir apenas de sua repetição em diversos tipos de encaixes (Figura 18). Pois bem, este módulo que

denominei ModTuk passou a ser nesse momento a base de um sistema que permite a criação de infinitas combinações modulares

Figura 18 — Registros de combinações do mesmo módulo, o ModTuk, formando estruturas estáveis e dinâmicas apenas a partir de sua repetição



Fonte: Fotografias do autor, 2021.

3.7 Modelos mentais na cultura, arte e filosofia

Isto posto, volto a discorrer sobre a imensa influência que os modelos mentais exercem sobre o pensamento criativo em geral. Enquanto discorro sobre estes modelos, estabeleço as relações com este processo criativo aqui descrito. Existem muitos precursores para a concepção do conceito de um modelo mental. Na tradição de pensamento que é herdeira da cultura greco-romana, uma das influências mais importantes é a noção de modularidade que é apresentada por Platão no livro *Timeu*. Neste diálogo entre Sócrates e o filósofo Timeu, é apresentada com detalhes a criação do mundo a partir dos quatro elementos. Estes, por sua vez, são formados a partir de puras formas geométricas retiradas do mundo das ideias, como o triângulo. De acordo com Platão, através de seu personagem Timeu, os elementos são criados a partir dos triângulos

originários do mundo perfeito e imutável das ideias e utilizados pelo Demiurgo na criação deste mundo, mutável e, portanto, imperfeito. Segundo Timeu, se algo é perfeito não mais se altera ou se transforma pois já atingiu a perfeição. Como vivemos em um mundo mutável onde tudo se transforma logo este mundo não pode ser perfeito. Tendo acesso a este mundo ideal das formas perfeitas um ser poderoso, mas não divino, o Demiurgo, vai compondo os seres e as coisas a partir da combinação dos elementos. Assim, apenas executando essas possibilidades de combinação ele cria tudo o que existe incluindo os seres humanos: “em boa verdade, os quatro gêneros são gerados a partir dos triângulos que elegêramos, três dos quais a partir do único que tem os lados desiguais, e o quarto foi o único harmonicamente constituído a partir do triângulo isósceles” (Platão, 2011, p. 142).

Timeu, o filósofo inventado por Platão neste texto, continua a sua discussão sobre a criação do nosso mundo sensível por um Demiurgo com acesso ao Mundo das ideias, e prossegue descrevendo a criação dos quatro elementos, módulos básicos que irão gerar todas as outras formas:

distribuíamos os gêneros que foram gerados pelo nosso discurso em fogo, terra, água e ar. Atribuíamos à terra a forma cúbica, pois a terra, dos quatro elementos, é o que tem mais dificuldade em mover-se e, dos corpos, o mais adequado para ser moldado — inevitavelmente e com certeza que foi gerado deste modo para que tivesse as bases mais estáveis. Se atribuímos esta forma à terra, e, das que restam, a forma mais difícil de movimentar à água, a que se movimenta melhor ao fogo e a intermédia ao ar; o corpo mais pequeno ao fogo, o maior à água, e o médio ao ar; o que é mais agudo ao fogo, o segundo mais agudo ao ar e o terceiro à água (Platão, 2011, p. 145–146).

Todo este sistema de criação de módulos universais a partir dos triângulos e suas posteriores recombinações pode ser entendido como um complexo modelo mental, um sistema modular de geração de formas cujas regras Timeu vai derivando enquanto deixa explícitas as etapas dessa criação. O modelo tem uma coerência interna e uma vez em que se sabe como cada parte se comporta (a terra é pesada e difícil de mover, a água tem o seu lugar abaixo da terra, o ar é leve e sobe e o fogo ainda mais leve e fica por cima de todos os outros) é possível pô-los em relação em experimentos mentais e a partir construir sistemas reais. E é exatamente o que faz Heron de Alexandria. Fazendo uso deste modelo dos quatro elementos e de suas propriedades e relações que o engenheiro grego Heron de Alexandria concebe o movimento de suas máquinas, registradas no compêndio *Pneumática*. Curiosamente Heron usa um modelo que não corresponde à nossa atual descrição da natureza, conforme sugere o seguinte trecho traduzido por mim:

A Pneumática é uma obra polêmica em dois livros, com 43 capítulos no primeiro e 37 no segundo. O livro começa com uma análise da pressão dos fluidos, que em algumas partes está correta e em outras não. Descreve também brinquedos mecânicos, pássaros que cantam, trombetas que soam, etc. (Papadopoulos, 2007, p. 7).

A influência dos modelos mentais em inúmeras áreas do pensamento e da criação ficou bastante evidente para mim a partir desta pesquisa, e comecei a encontrar conceitos semelhantes em muitas áreas. A dupla de filósofos Deleuze e Guattari (2010) descreve no livro *O Que é Filosofia* três espaços mentais diferentes, com três finalidades diversas. Eles estabelecem lugares mentais diferentes para a criação de conceitos em filosofia, nas ciências e nas artes, descrevem conceitos complexos ligados aos processos de criação e fazem uso de estruturas rizomáticas, amplificando o potencial das multiplicidades contidas em suas conexões. Os conceitos apresentados neste livro são bastante complexos e, sendo esta uma tese em Artes e especificamente em Procedimentos Artísticos, estes conceitos me interessam sobretudo como inspiração. Encontrei tanto neste livro, *O Que é Filosofia*, quanto em dois volumes dos *Mil Platôs*, conceitos, imagens e modelos mentais que servem a mim e a esta pesquisa. Nos volumes de *Mil Platôs*, especialmente os dois primeiros, Deleuze e Guattari (1995) também discorrem sobre conceitos que funcionam como anteparos para a produção estruturada dos pensamentos filosóficos. Conceitos como estratos, rizomas, multiplicidades e outras ideias propostas pela dupla de filósofos podem ser confusos para uma análise descontextualizada do mundo, mas se adequaram perfeitamente às minhas necessidades descritivas durante a produção desta pesquisa criativa. A partir do momento em que entrei em contato com este emaranhado de ideias criativas geradas por Deleuze e Guattari (1995, 2010), percebi com certa surpresa que se adequavam perfeitamente ao processo que venho desenvolvendo de modo contínuo, porém tortuoso, desde 2011, quando iniciei meus estudos dedicados à técnica do origami. No ano seguinte, estes estudos geraram as obras que chamei de SedaToys: criaturas feitas de origami modular a partir da combinação de 4 módulos de origens diversas. Já desde este momento estas estruturas poderiam ser descritas com os trechos seguintes:

1º e 2º - Princípios de conexão e de heterogeneidade: qualquer ponto de um rizoma pode ser conectado a qualquer outro e deve sê-lo (Deleuze; Guattari, 1995, p. 14).

3º - Princípio de multiplicidade: é somente quando o múltiplo é efetivamente tratado como substantivo, multiplicidade, que ele não tem mais nenhuma relação com o uno como sujeito ou como objeto, como realidade natural ou espiritual, como imagem e mundo. As multiplicidades são rizomáticas e denunciam as pseudomultiplicidades

arborescentes. Inexistência, pois, de unidade que sirva de pivô no objeto ou que se divida no sujeito (Deleuze; Guattari, 1995, p. 15).

4º - Princípio de ruptura a-significante: contra os cortes demasiado significantes que separam as estruturas, ou que atravessam uma estrutura. Um rizoma pode ser rompido, quebrado em um lugar qualquer, e também retoma segundo uma ou outra de suas linhas e segundo outras linhas (Deleuze; Guattari, 1995, p. 17).

Os trechos acima encadeados delineiam a forma que finalmente obtive com a obra criada: a forma de um rizoma: “Resumamos os principais caracteres de um rizoma: diferentemente das árvores ou de suas raízes, o rizoma conecta um ponto qualquer com outro ponto qualquer e cada um de seus traços não remete necessariamente a traços de mesma natureza” (Deleuze; Guattari, 1995, p. 31).

Estes mesmos trechos serão novamente evocados quando este texto tratar do conceito de matéria programável no capítulo a seguir, pois este modelo mental de um rizoma para mim passou a representar não apenas a obra que eu estava criando como é a representação ideal de uma matéria programável. O modelo mental que deu origem à minha criação é justamente um sistema onde peças-furo e peças-pino podem ser infinitamente combinadas e recombinações de modo a dar origem a infinitas formas, todas transformáveis uma vez que cada par furo-pino pode proceder a um giro no próprio eixo alterando assim a forma do conjunto sem que haja sequer desconexão.

Figura 19 — Alguns dos módulos integrantes do Sistema ModoriTuk e algumas de suas variações



Fonte: Composição de fotografias do autor tiradas em 2021.

Estas citações retiradas do *Mil Platôs* parecem descrever perfeitamente a obra criada por mim durante esta pesquisa de doutorado. O ModoriTuk é um sistema de módulos que podem ser livremente combinados e cujas estruturas criadas podem ser rompidas e reconectadas em qualquer ponto de conexão. O sistema traz em si uma multiplicidade inerente e não possui uma peça central, organizadora. Quando reli os dois primeiros volumes dos *Mil Platôs* durante esta pesquisa percebi que uma leitura anterior, realizada durante a minha graduação na década de 90,

provavelmente deixou influências inconscientes permanentes que foram se materializar mais de 25 anos depois quando parti para o processo criativo que me trouxe a este texto.

3.7.1 Enfim o modelo de um rizoma

Eu não me lembro exatamente quando resolvi criar módulos que representassem a haste e o chapéu de um fungo, mas procurando nos meus arquivos encontrei o primeiro registro em fotos de um ModTuk em formato de fungo em 8 de dezembro de 2021.

Figura 20 — Conjunto de peças ModoriTuk conectadas formando um fungo brotando um chapéu, impresso em PETG



Fonte: Fotografia do autor, 8 de dezembro de 2021.

Em meus registros organizados por data, alguns meses antes encontrei esta imagem de uma pequena escultura japonesa que havia salvado, como faço com muitas outras imagens, para referências criativas:

Figura 21 — Escultura japonesa de um grupo de fungos



Fonte: String [...] (séc. XIX).

Tratando esta pesquisa de uma documentação de um processo criativo, preciso deixar registrado que é bem provável que a imagem acima, guardada por mim em junho de 2021, tenha disparado um processo inconsciente que levou à criação de módulos fúngicos para o sistema ModoriTuk seis meses depois.

Figura 22 — Composição de fotografias de conjunto de peças ModoriTuk que quando conectadas formam o modelo de um micélio



Fonte: Fotografias do autor, 2022.

Novamente faço uma digressão nesta descrição para que ela seja fiel ao processo criativo que descrevo. Foram muitas as leituras aleatórias às quais tive acesso durante a produção desta pesquisa. Através de conversas com uma amiga fiquei conhecendo o trabalho da antropóloga sino-americana Anna Tsing (2015, 2019), que estuda o ambiente cultural que se forma ao redor do pinheiro vermelho e dos fungos que crescem ao seu redor em florestas da Califórnia e analisa

todas as complexas necessidades de cada um dos membros dessa assembleia, como ela chama, e da qual o ser humano também faz parte ao colher os fungos. Os grupos humanos que se formam ao redor do cogumelo incluem os imigrantes asiáticos do pós-guerra que foram acolhidos nos EUA, porém sem nenhuma garantia ou apoio, e encontraram na colheita dos fungos o mesmo sustento que tiravam das florestas asiáticas. Ela concebe um modelo de relações entre espécies onde todo um ambiente se forma ao redor dos fungos sem que nenhuma espécie precise assumir o protagonismo. A este modelo em formato de rede, Tsing dá o nome de assembleia. Eu também classifico esta descrição de Anna Tsing (2015, 2019) como um modelo mental e, por relação temática com os fungos, me interessei por sua obra, que acabou por participar desta pesquisa. A assembleia de Anna Tsing (2015, 2019) é um conjunto de seres que de alguma forma dependem uns dos outros pois a ação de uns cria as condições para a ação dos outros. O ser humano neste modelo é apenas um dos elementos do sistema e ao menos neste pequeno sistema ajuda a manter o equilíbrio dinâmico do conjunto natural de elementos em harmonia. O modelo mental que ela descreve é um pequeno ecossistema simbiótico composto de espécies que interagem e se equilibram.

É importante deixar bastante claro que o conceito de modelo mental que estou aplicando nesta pesquisa não pretende ter uma validade universal e embora eu acredite que o conceito de modelo mental seja necessário para a criação artística que faz uso de elementos científicos, esta tese não reúne evidências exaustivas disto. Todo o processo aqui descrito gira em torno da criação do sistema modular que chamei de ModoriTuk e os conceitos aqui apresentados não precisam ter uma validade autônoma, para fora desta pesquisa. Lembro mais uma vez que esta é uma pesquisa em arte e tecnologia e é a descrição de um processo criativo e dos caminhos que informaram e modelam este processo.

3.8 Criando com conceitos científicos

Voltando aos modelos mentais, a descrição destes conceitos e destes espaços mentais descritos por Deleuze e Guattari (1995, 2010), o plano de imanência, o plano de referência e o plano de composição influenciaram o meu imaginário para que eu passasse a tratar a ideia de modelo mental como algo natural. Devido às conexões da minha pesquisa com os métodos e conhecimentos da ciência, continuo esta descrição das ideias complexas dos autores pelo plano de referência.

Deleuze e Guattari (2010) chamam esse lugar imaginário, o espaço mental onde a ciência desenvolve as suas teorias, de plano de referência. O plano de referência é um lugar onde as ideias precisam se acomodar à física, à matemática e às regras da natureza descritas pelas teorias científicas. O plano de referência faz a interface entre o espaço de criação e o espaço da descrição. A criação dentro da ciência é sempre a descrição de uma teoria, é uma narrativa sobre a natureza que acontece apoiada em gráficos e números dentro do espaço puramente mental do plano cartesiano ou através da conexão entre diversos planos cartesianos, cada um com seu par de qualidades que o define.

Neste sentido, em minha compreensão do plano de referência deleuze-guattariano ele parece ser derivado do plano cartesiano, mas se assume um espaço de criação ao invés de um espaço objetivo. O plano cartesiano se pretende objetivo e preciso, pois precisa medir e descrever a realidade objetiva e suas regras com as métricas matemáticas. No plano de referência, a realidade objetiva é transformada em um modelo descrito dentro do plano de referência. O modelo se apoia no plano cartesiano e na linguagem narrativa — é a descrição de um processo de mudança que acontece dentro das dimensões da realidade e entre as conexões estabelecidas dessas dimensões.

O plano de referência é, portanto, o espaço de criação mental de onde surgem as ideias científicas. Ideias estas que só fazem sentido dentro da realidade. Conforme Popper (1974), se a teoria não mais explica a realidade, que se mude a teoria, pois a realidade é definitiva.

Além deste espaço mental onde a ciência é capaz de criar plano de referência, Deleuze e Guattari (2010) definem mais dois outros espaços mentais. Para a filosofia, área do conhecimento que se dedica à criação de conceitos, eles propõem o Plano de Imanência. E para a Arte, o Plano de Composição. O conjunto de citações abaixo elencadas formam um grupo coerente e definem o espaço da criação onde realizei esta pesquisa. No grupo abaixo reunido enxerguei praticamente uma descrição da obra desenvolvida por mim mesmo que os autores aqui estejam descrevendo outra coisa, ou seja, o espaço da criação de conceitos em filosofia:

Com efeito, todo conceito, tendo um número finito de componentes, bifurcará sobre outros conceitos, compostos de outra maneira, mas que constituem outras regiões do mesmo plano, que respondem a problemas conectáveis, participam de uma cocriação. Um conceito não exige somente um problema sob o qual remaneja ou substitui conceitos precedentes, mas uma encruzilhada de problemas em que se alia a outros conceitos coexistentes (Deleuze; Guattari, 2010, p. 29).

A filosofia procede por um plano de imanência ou de consistência; a ciência, por um plano de referência. No caso da ciência, é como uma parada da imagem. É uma fantástica desaceleração, e é por desaceleração que a matéria se atualiza, como

também o pensamento científico, capaz de penetrá-la por proposições. [...] Os primeiros functivos são, pois, o limite e a variável, e a referência é uma relação entre valores da variável ou, mais profundamente, a relação da variável, como abcissa das velocidades, com o limite (Deleuze; Guattari, 2010, p. 153).

Não são relações, mas números, e toda a teoria das funções depende de números. Invocar-se-á a velocidade da luz, o zero absoluto, o quantum de ação, o Big Bang: o zero absoluto das temperaturas é de -273,15 graus; a velocidade da luz, 299.796 km/s, lá onde os comprimentos se contraem a zero e onde os relógios param. [...] A ciência não é impregnada por sua própria unidade, mas pelo plano de referência constituído por todos os limites ou bordas sob as quais ela enfrenta o caos. São estas bordas que dão ao plano suas referências (Deleuze; Guattari, 2010, p. 154).

As citações reunidas acima, na minha leitura, formam um conjunto e sugerem a interpretação a seguir que faço sobre o conceito de plano de referência. O plano de referência cria um espaço híbrido que é formado pela conexão da linguagem matemática oriunda dos dados observados na natureza com as descrições de processos dinâmicos oferecidas pela força da narrativa. É a força da criação narrativa que é capaz de transformar algumas funções localizadas e específicas de certos fenômenos recolhidas junto à natureza em regras gerais que descrevem o comportamento da natureza em momentos genéricos aleatoriamente escolhidos. A força deste plano de referência é tal que, uma vez criado o modelo mental, ele ocupa a realidade com uma série de réguas em relação umas com as outras e pode ser aplicado a qualquer ocasião a que as regras descritas se apliquem.

A realidade sintetizada neste modelo passa a ser portátil e o modelo pode ser aplicado a qualquer novo fenômeno, seja para confirmar a potência do modelo ou para, como propõe Popper (1974), provar falso o modelo até então dado como correto. Por causa de Karl Popper (1974), dentro da ciência contemporânea todos os modelos estão sob ataque constante, mesmo os mais estabelecidos. Popper pega qualquer modelo científico e joga no meio da avenida para atravessar a faixa de pedestre em um local sem sinal durante o rush em uma cidade grande. A regra diz que os carros devem parar. Se a regra se sustenta em relação aos fatos da realidade, o modelo sobrevive, a teoria ganha sobrevida e o modelo ganha força. Esse teste da falseabilidade de qualquer teoria científica me parece o uso mais puro da ideia de modelo na ciência. O modelo precisa ser preciso e ser útil. O modelo precisa ser sempre aprimorado e será rejeitado quando for vencido pela diversidade dos fenômenos. O plano de referência operando com as regras de Popper (1974) devora os próprios filhos desobedientes, como um Cronos faria quando os filhos que surgem em suas entranhas quantificáveis não vencem a prova da objetividade e tem a sua inconsistência interna revelada. A revelação das falhas do modelo só é possível porque, segundo a leitura que fiz inspirada pelos conceitos de Deleuze e Guattari (2010), há um

plano de referência que se baseia em métricas da realidade mensurável e está estruturado em uma narrativa consistente.

Contudo, só reconhecerei um sistema como empírico ou científico se ele for passível de comprovação pela experiência. Essas considerações sugerem que deve ser tomado como critério de demarcação, não a verificabilidade, mas a falseabilidade de um sistema. Em outras palavras, não exigirei que um sistema científico seja suscetível de ser dado como válido, de uma vez por todas, em sentido positivo; exigirei, porém, que sua forma lógica seja tal que se torne possível validá-lo através de recurso a provas empíricas, em sentido negativo: deve ser possível refutar, pela experiência, um sistema científico empírico (Popper, 1974, p. 42).

A partir de Popper (1974), as ideias e os modelos em ciências são sempre potencialmente provisórios.

3.8.1 Modelos mentais no ensino de ciências exatas

Segundo Kenneth Craik (1943), que parece ser o primeiro autor a mencionar a ideia de modelo mental¹⁹:

Uma das propriedades mais fundamentais do pensamento é o seu poder de prever acontecimentos. Este fato dá a ele um imenso significado adaptativo e construtivo, tal como referido por Dewey e outros pragmatistas. Permite-nos, por exemplo, conceber pontes com um fator de segurança suficiente, em vez de as construirmos ao acaso e esperarmos para ver se se desmoronam.

[...] este processo de raciocínio produziu um resultado final semelhante ao que poderia ter sido alcançado fazendo com que os processos físicos reais ocorressem (por exemplo, construindo a ponte).

Qualquer tipo de modelo de trabalho de um processo é, em certo sentido, uma analogia. Por ser diferente, está sujeito a uma ruptura por apresentar propriedades que não se encontram no processo que imita ou por não possuir propriedades que o processo que imita possui.

Com estas últimas citações, traduzidas por mim, atingimos o cerne da questão do modelo mental, ele precisa estar em relação com regras estabelecidas. Dentro da ciência estas regras são conhecidas, porém é possível criar modelos com regras próprias de uma realidade imaginada e isto, em minha descrição provisória deste conceito, também cria um modelo mental.

¹⁹ C. S. Peirce pode ter definido este conceito ainda no século XIX, mas esta pesquisa não se debruçou sobre a obra deste autor.

Também encontrei, e traduzi do texto original, uma descrição de modelo mental aplicado ao ensino de programação:

O que é um modelo mental? Como o nome sugere, é uma representação simplificada das partes mais importantes de um determinado domínio problemático que é suficientemente boa para permitir a resolução de problemas. Um exemplo são os modelos de moléculas em forma de bola e mola utilizados na química do ensino secundário. Os átomos não são realmente bolas e as suas ligações não são realmente molas, mas o modelo permite às pessoas raciocinar sobre os compostos químicos e as suas reações. Um modelo mais sofisticado de um átomo tem uma pequena bola central (o núcleo) rodeada por elétrons em órbita. Também está errado, mas a complexidade adicional permite às pessoas explicar mais e resolver mais problemas. Tal como o software, os modelos mentais nunca estão acabados: são apenas utilizados (Wilson, 2019).

Mas o principal uso do conceito de modelo mental parece ser em psicologia cognitiva:

Johnson-Laird sugere que as pessoas raciocinam com modelos mentais. Modelos mentais são como blocos de construção cognitivos que podem ser combinados e recombinaos conforme necessário. Como quaisquer outros modelos, eles representam o objeto ou situação em si; uma de suas características mais importantes é que sua estrutura capta a essência (se parece analogicamente) dessa situação ou objeto (Hampson e Morris, 1996, p. 243) Portanto, na perspectiva de Johnson-Laird, representações proposicionais são cadeias de símbolos que correspondem à linguagem natural, modelos mentais são análogos estruturais do mundo e imagens são modelos vistos de um determinado ponto de vista (1983, p. 165) (Moreira, 1997, p. 3)

E parei com este levantamento, pois assim que cheguei a Piaget e Peirce e percebi a importância e contribuição potencial de ambos para este conceito, percebi que já estava iniciando uma nova pesquisa.

3.9 Minha definição de modelo mental

Em resumo, modelo mental é um conceito que demorei pra encontrar bem definido e delimitado em alguma literatura e por isso parti para uma definição própria que me servisse. Quando finalmente encontrei uma definição, entendi que este conceito é usado principalmente no ensino de certas áreas das ciências exatas e das engenharias e, portanto, esta definição não corresponde exatamente ao conceito que eu estava fazendo uso.

Como nenhuma destas definições satisfaz realmente as necessidades desta pesquisa, acrescento finalmente a este levantamento de definições a minha própria definição. A definição que apresento é uma tentativa de esclarecer este conceito que me surgiu de modo intuitivo

durante o processo criativo que esta pesquisa descreve. Para melhor conduzir o pensamento dentro desta pesquisa e dentro deste texto me vi obrigado a desenvolver o conceito de modelo mental que descrevo a seguir.

Um modelo mental para mim é um objeto imaginário cuja descrição é tão precisa que pode ser compartilhada por mais pessoas. Este objeto imaginário terá propriedades também compartilhadas entre todas as pessoas que o estiverem imaginando. O modelo mental prevê uma ou mais mudanças de estado, ou seja, ele pode ter algum movimento desencadeado entre suas partes: ao menos uma operação no tempo faz parte do modelo. Estas propriedades podem ser a reprodução de características de objetos reais, conhecidos, ou podem ser propriedades existentes apenas dentro do modelo, cuja descrição é parte integrante dele. O modelo mental como eu concebo, portanto, é um grupo de objetos imaginários (ou um objeto composto de partes) em relação uns com os outros, formando um sistema ou uma estrutura articulada ou conectada de alguma forma. O modelo mental não precisa ser totalmente descrito em seus mínimos detalhes, basta formar uma estrutura consistente o suficiente para ser compartilhada mentalmente. Para ser compartilhado, o modelo faz uso de uma linguagem simbólica, mas o conceito que estou tentando descrever não está atrelado a um grupo de palavras ou símbolos específicos; a ênfase que estou propondo é na imagem mental compartilhada. Esta imagem mental, repito, não se confunde de forma nenhuma com o conceito de mapas cerebrais de Damásio (2010). Modelo mental aqui não é uma percepção do mundo e sim um objeto imaginário ainda que seja, eventualmente, um símile de um objeto existente oriundo de uma percepção de mundo.

Para facilitar a compreensão faço uso de alguns exemplos. Imagine uma estrutura formada por dois cubos transparentes e iguais dispostos lado a lado. Um dos cubos está cheio de fumaça enquanto o outro está vazio. A parede que separa os dois cubos é móvel e pode ser eliminada rapidamente. Este é um modelo simples e autossuficiente. Não importa a cor ou a densidade da fumaça e nem a escala dos cubos. Este modelo poderia ser descrito sem palavras, apenas com rabiscos em um papel. Também poderia ser descrito com uma estrutura modelada em 3D ou mesmo com um protótipo físico. Ainda assim, depois de conhecido, este modelo é autônomo e opera na mente. Suas mudanças de estado podem ser previstas por mais de uma pessoa. O que acontece se a parede que divide os cubos, um cheio de fumaça e o outro vazio, é retirada?

Outro modelo mental: existe um deserto nos Estados Unidos da América onde são frequentes as tempestades elétricas, ou seja, chuvas intensas com ampla ocorrência de raios. O artista Walter de Maria instalou, em 1977, 400 para-raios neste deserto. Apesar de isto ser a descrição de uma obra que existe realmente, o modelo mental criado a partir de sua descrição é autônomo e qualquer pessoa pode imaginar o que acontece quando esta obra encontra uma tempestade.

Em resumo, um modelo mental da maneira que eu concebi é um objeto imaginário composto de partes relacionadas e submetido às leis da física ou a leis também imaginárias, mas descritas no modelo e que são, portanto, partes integrantes dele. O modelo pode ser compartilhado por duas ou mais pessoas ou entidades pensantes a partir do uso da linguagem, mas não está restrito a uma linguagem específica, a ênfase que dou é no objeto imaginário que se forma, para além da linguagem que o transportou.

Nestes modelos há sempre uma possibilidade de mudança de estado que resultará em outras mudanças não descritas no modelo, mas perfeitamente previsíveis por todo mundo que conheça o mundo real ou as regras do mundo imaginado.

Para o desenvolvimento deste conceito de modelo mental, me inspirei fortemente nas imagens que coletei junto a autores que promovem divulgação científica. A ciência de ponta dos séculos XX e XXI tem aspectos de difícil compreensão, mesmo com seus frutos sendo fundamentais para a vida cotidiana da população em geral. Chuveiro quente, elevador, telefonia celular, computação, medicina e muitas outras conquistas devem seu sucesso ao conhecimento científico que as lastreia.

No entanto, a imensa maioria das pessoas desconhece os fundamentos da teoria quântica que fundamenta a computação, por exemplo. Mesmo o funcionamento básico da eletricidade é ignorado pela maioria da população. A arte com foco em tecnologia pode criar formas para ajudar a facilitar esta compreensão ainda que sejam meras imagens mentais das quais uma possibilidade é aquilo que estou chamando de modelos mentais.

Alguns destes modelos que colecionei para entender essas teorias científicas complexas, mas que fundamentaram os dispositivos de uso comum e também os aparelhos usados na arte tecnológica são fruto da conexão entre informações trazidas por divulgadores científicos de cada área específica com uma construção imagética concebida por mim mesmo. Um aspecto importante é o fato de a fonte de muitas ideias científicas não ser visual, mas matemática. É físico-matemática. A teoria que temos da física quântica é uma junção do resultado da medição

de inúmeros experimentos com um conjunto de regras oriundas da matemática, fórmulas criadas por gerações de cientistas desde a passagem do século XIX para o século XX. O registro das energias geradas na colisão de partículas gera dados matemáticos relacionando o tempo com quantidade ou posição de matéria.

A passagem do modelo mental para a programação da matéria envolve apenas a realização das possibilidades do modelo através do uso adequado das forças e materiais utilizados. Se bem realizada, a obra funciona e é capaz de mudar de forma, de evoluir no tempo, de alterar o próprio estado conforme o tempo se desenrola. Uma máquina é uma escultura no tempo, um filme de escultura.

3.9.1 Associações livres anteriores que me levaram ao conceito de modelo mental

Esta tese de doutoramento é sobretudo a descrição de um processo criativo. Neste trecho da pesquisa quero tomar a liberdade de estabelecer relações não óbvias entre diversas áreas do conhecimento que possuem algumas características em comum. Estas características são o que conecta todos os conhecimentos descritos a seguir com a minha pesquisa em matéria programável, modelos mentais e, finalmente, com o ModoriTuk.

Consigo rastrear o meu primeiro *insight* desta questão quando passei a prestar atenção a certas coisas do cotidiano, especificamente as coisas que grudam, que engancham e que soltam. Existe uma categoria ampla de coisas que me interessam, são coisas que compartilham a característica de se encaixarem, de se prenderem umas nas outras ao entrarem em contato e a partir daí se arrastarem quando se deslocam. E estas observações contínuas acabaram por gerar uma série de pensamentos estruturados sobre esta categoria de coisas que se conectam e inclui também as coisas que giram depois de associadas. Talvez a curiosidade sobre todos estes fenômenos tenha sido a verdadeira origem desta pesquisa.

Em resumo, esta pesquisa começa quando passei a prestar atenção em certas coisas do mundo que, tendo uma existência individual, são levadas a um acoplamento com alguma outra coisa e a partir daí tem a sua ação limitada por um sistema. Sistema este que esta coisa qualquer ajuda a produzir desde o momento do acoplamento até a sua eventual dissolução.

Uma descrição ampla e genérica como esta poderia ser aplicada tanto a blocos de Lego quanto a um fio que se enrosca em outro atrás de uma mesa. Uma forma de classificação tão ampla poderia acabar não servindo para nada. Mas, precisamente por ser esta definição quase

rarefeita, serve também para a situação em que a forma se instaura, se inaugura. Funciona para descrever o contexto em que alguma forma nova é gerada justamente a partir desta conexão entre partes diversas que no momento imediatamente anterior estavam separadas no mundo.

Para tentar estabelecer uma categoria comum entre estes dois métodos de programação de movimentos/formas com outros métodos usados desde as máquinas de tecelagem até a robótica, eu imaginei situações através das quais é possível programar também uma sequência de cores, alternando e combinando comprimentos de onda e daí em diante. Antes de ter claro que a minha pesquisa era a descrição de um processo criativo permaneci algum tempo envolto a estas inúmeras ideias de várias áreas diferentes começando com a mecânica, chegando na eletrônica e por fim em sistemas biológicos e autoprogramados como proteínas e afins.

Portanto em nome da precisa descrição deste processo criativo, retomo neste final de capítulo ideias que me vieram como disparadoras deste processo logo em seu início. O primeiro esboço de uma sistematização desta pesquisa foi esse conjunto de palavras e expressões que poderia ser mais bem representada em um modelo tridimensional com vetores ligando cada um destes itens a vários outros. Agora ao final e tendo chegado em resultados satisfatórios, listo estes primeiros conceitos que me inspiraram e me levaram ao caminho da pesquisa. Listados de maneira linear, mas formando uma nuvem de palavras na minha percepção, estas foram muitas das primeiras influências nesta pesquisa:

O que a tecelagem, circuitos eletrônicos, autômatos e origamis têm em comum | programar a forma | programar a cor | máquinas e moléculas | vibração e transmissão de movimento | programar o comportamento da energia | programar a interação das formas | matéria & energia | de onde vem o movimento | a teoria cromodinâmica dos quarks | os campos quânticos e a gravidade | objetos técnicos ou a energia transmitida de um corpo a outro gerando: luz, calor, som ou movimento | transmissão de energia a partir de uma bateria (ou corda) dentro do corpo gerando o chamado movimento autônomo - no Califado Abássida²⁰ | a redescoberta de Ctesibius e Heron de Alexandria | transmissão externa em tempo real de energia gerando movimento semelhante | autômatos gregos, árabes, chineses | o sismógrafo de Chang Heng²¹ | karakuri japoneses | autômatos europeus, renascentistas | animatrônicos

²⁰ Durante a expansão Islâmica no norte da África, entre os séculos VIII e XII, houve a instauração de um Califado que fundou um centro de pesquisas, a Escola do Saber. A partir da tradução de antigos textos gregos para o árabe este Califado promoveu um gigantesco avanço da ciência. Neste contexto surgiram engenheiros como Al Jafari que criaram autômatos cujo funcionamento se devia ao uso preciso de cordas ou de sistemas hidráulicos. Para mais informações ver Nadarajan (2007).

²¹ Informações da Enciclopédia Britannica (Zhang Heng, 2025).

contemporâneos | origamis cinéticos | origamis modulares | topografia, mapeamentos e relações de superfícies através de seus pontos | aplicações das criações matemáticas e geométricas de Pitágoras/Platão/Euclides culminando no plano cartesiano e na criação de um novo mundo tecnológico | geometrias não euclidianas gerando outras possibilidades de mundos com outras regras de construção do espaço | Lobachevsky, Riemann | fabricação digital ou o domínio da passagem do virtual/matemático de volta para a construção no espaço tridimensional abrangendo impressão 3D, corte a laser, roteadora CNC.

Estas foram as muitas inspirações que me surgiram no caminho desta pesquisa. Como se nota, o trabalho de escrita de todo este conteúdo com seus mapeamentos e suas descrições teria sido hercúleo e demandaria tanto tempo de leitura e análises que mesmo se pudesse ser realizado e concluído por mim no prazo deste doutorado não sobraria nada para realizar a pesquisa prática. Então abandonei quase a totalidade dos conceitos listados, mantendo-os apenas como inspiração inconsciente e o caminho escolhido foi perseguir a criação prática enquanto passeava por alguns destes temas recolhendo algumas referências bibliográficas sobre eles no caminho da criação, sem a pretensão de esgotar nenhum desses assuntos.

Conforme a pesquisa avançava, cheguei a outra forma mais abrangente de organizar tudo o que eu venho coletando durante a pesquisa. Tentando encaixar todas estas fontes em grandes categorias, cheguei a subdivisões de uma mesma categoria que são as “estruturas articuladas e que podem mudar de forma e/ou produzir movimento”. Esta definição acaba também por evocar um modelo mental próprio.

Entendendo articulação de uma maneira muito ampla como uma ponte móvel que permite conectar dois pontos quaisquer no espaço-tempo, que mesmo quando anteriormente independentes tornam-se partes de estruturas que seguem se articulando sistema adentro e afora.

Estas categorias apresentadas aqui foram propostas e me ajudaram a organizar as influências encontradas durante esta pesquisa até o momento de criação da obra gerada por ela. Dentro do espírito de desconfiança permanente em relação à ciência que Popper (1974) propõe, considero todas estas categorias e classificações apenas lentes provisórias de compreensão de aspectos da natureza da criação das formas, sem a pretensão de definir nada de modo permanente. Serviram a mim durante esta pesquisa e deixo tudo isto aqui registrado nesta tese.

Os trechos a seguir formam um conjunto que se aproxima muito da descrição do tipo de pesquisa que acredito ter feito e registrado neste texto e por isto os reproduzo a seguir:

Partindo duma natureza semelhante a um autômato, submetida a leis matemáticas cujo calmo desenvolvimento determina para sempre seu futuro tal como determinou seu passado, chegamos hoje a uma situação teórica completamente diferente, a uma descrição que situa o homem no mundo que ele mesmo descreve e implica a abertura desse mundo. Não é exagero falar dessa transformação conceitual como de uma verdadeira metamorfose da ciência. [...] a metamorfose que vamos descrever renova a nossa concepção das relações dos homens com a natureza e a ciência como prática cultural (Prigogine; Stengers, 1991, p. 1).

A própria ambição de reduzir o conjunto de processos naturais a um pequeno número de leis foi abandonada. As ciências da natureza descrevem, de ora em diante, um universo fragmentado, rico de diversidades qualitativas e de surpresas potenciais. [...] Não são mais as situações estáveis e as permanências que nos interessam antes de tudo, mas as evoluções, as crises e as instabilidades. Já não queremos estudar apenas o que permanece, mas também o que se transforma, as perturbações geológicas e climáticas, a evolução das espécies, a gênese e as mutações das normas que interferem nos comportamentos sociais (Prigogine; Stengers, 1991, p. 5).

Encontramo-nos num mundo irredutivelmente aleatório, num mundo em que a reversibilidade e o determinismo figuram como casos particulares, em que a irreversibilidade e a indeterminação microscópicas são regra (Prigogine; Stengers, 1991, p. 8).

A ciência newtoniana é uma ciência prática, uma das suas fontes é muito claramente o saber dos artesãos da Idade Média e dos construtores de máquinas; ao menos em princípio, ela própria fornece os meios de agir no mundo, de prever e modificar o curso de certos processos, de conceber dispositivos próprios para utilizar e explorar certas forças e recursos materiais da natureza (Prigogine; Stengers, 1991, p. 26).

E termino este capítulo com uma última citação da filósofa Susanne Langer (2016):

Se a ciência concebe o mundo como um lugar onde o imprevisível e o regular se alternam e se combinam é porque este é um mundo absolutamente dinâmico. Um mundo onde tudo muda o tempo todo enquanto a energia lentamente se dispersa e a entropia apenas aumenta. A vida parece ser uma tendência que se opõe a este fato científico, organizando ao invés de dispersar, criando ordem ao invés de entropia.

Acredito ter feito esta pesquisa seguindo uma necessidade de organização criativa apesar das forças de dispersão, internas e externas.

4 A MATÉRIA PROGRAMÁVEL

4.1 Duas maneiras de programar a matéria

Este capítulo apresenta o conceito de programação da matéria e discute a aplicação deste conceito durante esta pesquisa. Também detalha a importância desse conceito no desenvolvimento prático do sistema ModoriTuk, uma pesquisa complexa no campo da criação artística que gerou o processo criativo do qual trata esta tese de doutorado. A discussão se inicia quando estabeleci uma comparação entre algumas técnicas de criação de origamis cinéticos e certas características de estruturas mecânicas como autômatos. Dentro deste capítulo, irei sistematizar alguns pensamentos e ideias que serviram de subsídio para alimentar a criação de um sistema analógico de matéria programável fazendo uso de tecnologias sofisticadas, porém atualmente de baixo custo.

Durante a minha pesquisa de mestrado (Moraes, 2018), desenvolvi o interesse por algumas técnicas de criação de origami, incluindo os origamis modulares e os origamis cinéticos. Conforme ampliava meu repertório de dobras e estudava cada modelo realizado, percebi semelhanças entre os modelos de origamis cinéticos e as estruturas dos autômatos. Inspirado por algumas destas semelhanças formais um tanto vagas, estabeleci um princípio de hipótese partindo da suspeita de que ambos os modelos cinéticos, tanto os origamis quanto os autômatos, poderiam ser descritos por uma teoria única. Venho chamando essa teoria de *programação da matéria* e os resultados práticos da aplicação desta teoria de *matéria programável*.

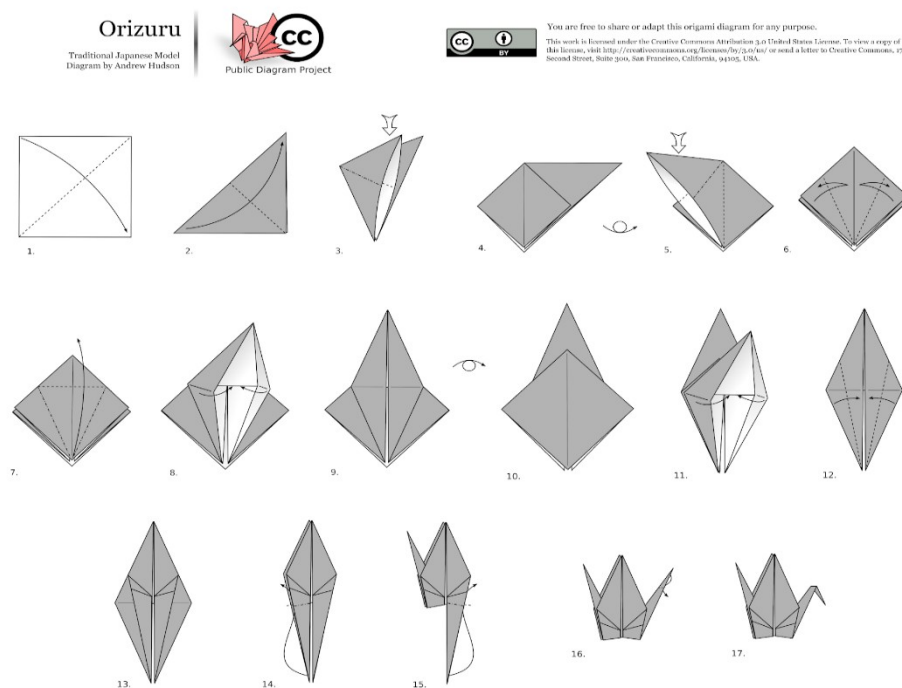
É possível afirmar genericamente que a matéria programável consiste em uma estrutura física com a capacidade de mudar de forma para cumprir funções específicas. Esta definição é ampla o suficiente para descrever inúmeras estruturas tanto oriundas do mundo natural quanto criações humanas, artificiais, sejam elas físicas, teóricas ou ficcionais. Este capítulo passeia entre algumas destas variedades de matéria programável, mantendo um foco nas características que me ajudaram a informar o desenvolvimento da minha variação autoral e prática deste conceito. Alguns exemplos da aplicação deste conceito na arte também serão apresentados, com ênfase nos artistas e obras que funcionaram como inspiração para o desenvolvimento dos ModoriTuks. Novamente aqui evoco a teórica Cecília de Almeida Salles (2006) quando ela propõe, dentro da pesquisa em criação artística, “a necessidade de se pensar a criação artística

no contexto da complexidade, romper o isolamento dos objetos ou sistemas, impedindo sua descontextualização e ativar as relações que os mantêm como sistemas complexos.” Deixando mais claro: nem tudo o que será apresentado com inspiração e influência para a criação do ModoriTuk exibe uma semelhança formal ou evidente com o sistema criado por mim. As influências no processo criativo podem ser difusas, e o sistema ModoriTuk é fruto de uma vida inteira de influências das quais eu trouxe para este texto apenas as mais significativas. E neste capítulo destaco as influências que se encontram nas áreas correlatas à matéria programável em suas diversas formas.

4.1.1 Origami como matéria programável

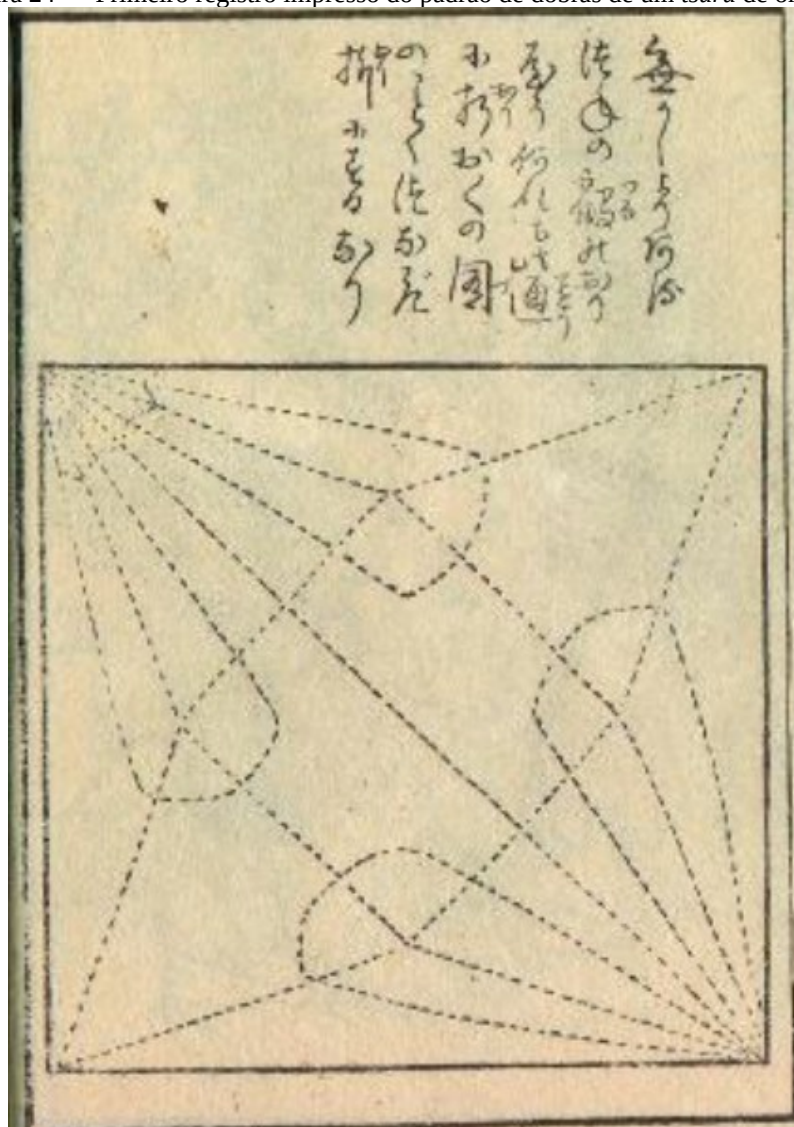
1. Dentro da cultura do origami qualquer praticante é capaz de entender imediatamente esta técnica como uma “programação do papel”, um processo que começa com uma folha lisa e termina com uma figura tridimensional. O aspecto escultórico do papel é atingido apenas dobrando-se o papel seguindo uma ordem ou um “programa” executado pelas mãos.

Figura 23 — Sistema de notação contemporâneo mostrando o passo a passo de como dobrar um *tsuru*



Fonte: Orizuru (2025).

Figura 24 — Primeiro registro impresso do padrão de dobras de um *tsuru* de origami



Fonte: Shūsui (1797).

Deste modo, o “programa” que cria o origami fica embutido na própria matéria em que ele se apresenta. Esta expressão — *programação* — aplicada ao origami para mim parecia ser mais uma metáfora do que exatamente uma descrição literal, pois um programa é algo digital que ocorre em endereços de memória conforme instruções gravadas em portas lógicas e executadas por transístores cujo sistema segue o modelo criado por Alan Turing e melhor descrito mais adiante neste texto. Ainda assim, de um modo diverso, a programação da forma realizada pelas mãos em um papel até resultar em um origami e a programação de uma sequência de movimentos a serem realizadas por um robô guardam algumas semelhanças. Após aprofundar esta pesquisa em busca do conceito de programação da matéria, acabei por perceber que o uso do termo “programação” em contextos não digitais já era algo consagrado em muitas

áreas e há muito tempo. De qualquer modo, a dita programação do origami está, me parece, mais próxima da programação de um autômato: um tipo de programação em que a execução do programa acontece devido à forma embutida na própria matéria. Uma deformação específica que faz com que o papel se comporte de uma determinada maneira: a dobra cria uma alavanca em forma de dobradiça articulando assim três espaços diferenciados num mesmo material contínuo: uma superfície plana, uma linha e outra superfície plana. Assim como a posição dos componentes, engrenagens e polias, determinam o comportamento de um autômato são as dobras de montanha ou de vale e a ordem com que são executadas pela máquina humana que determinam a forma do origami.

Figura 25 — Ilustração explicativa sobre dobras de vale e dobras de montanha

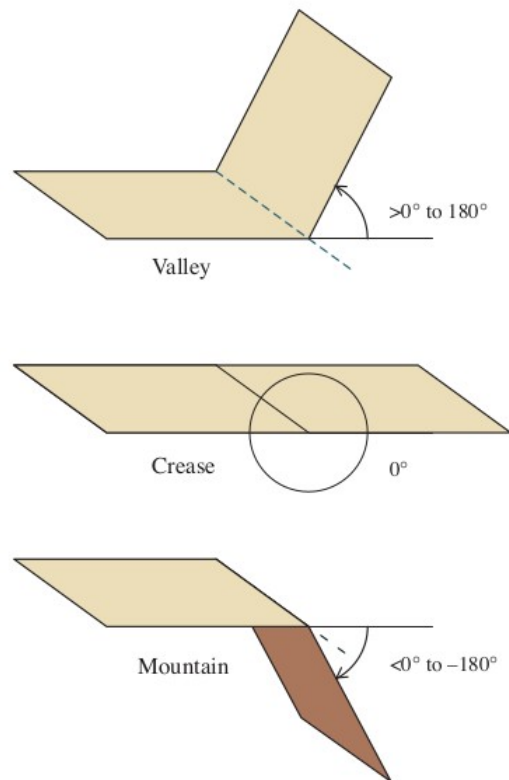
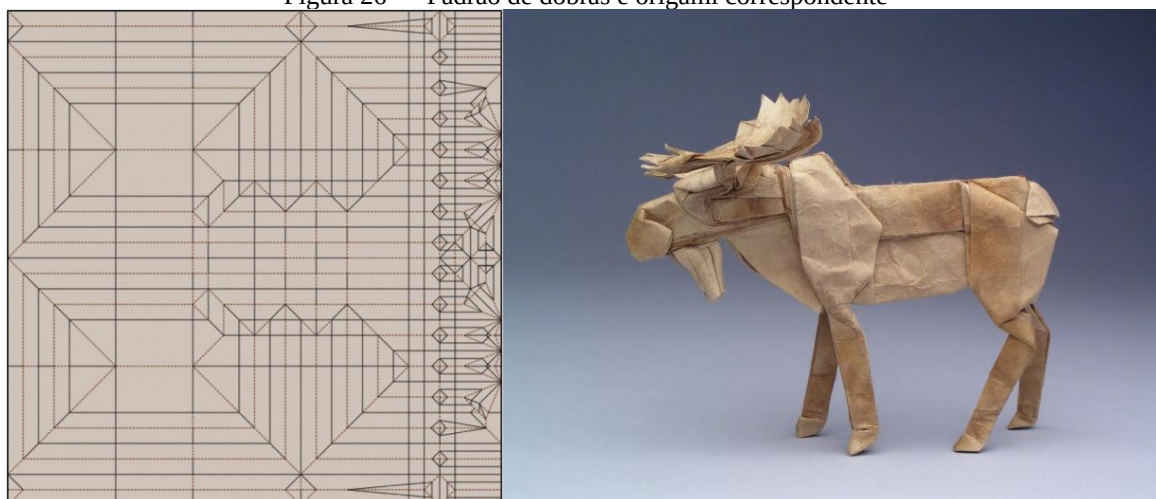


Figure 2.2.

Valley folds, creases, and mountain folds are all part of a continuum.

Fonte: Lang (2003).

Figura 26 — Padrão de dobras e origami correspondente

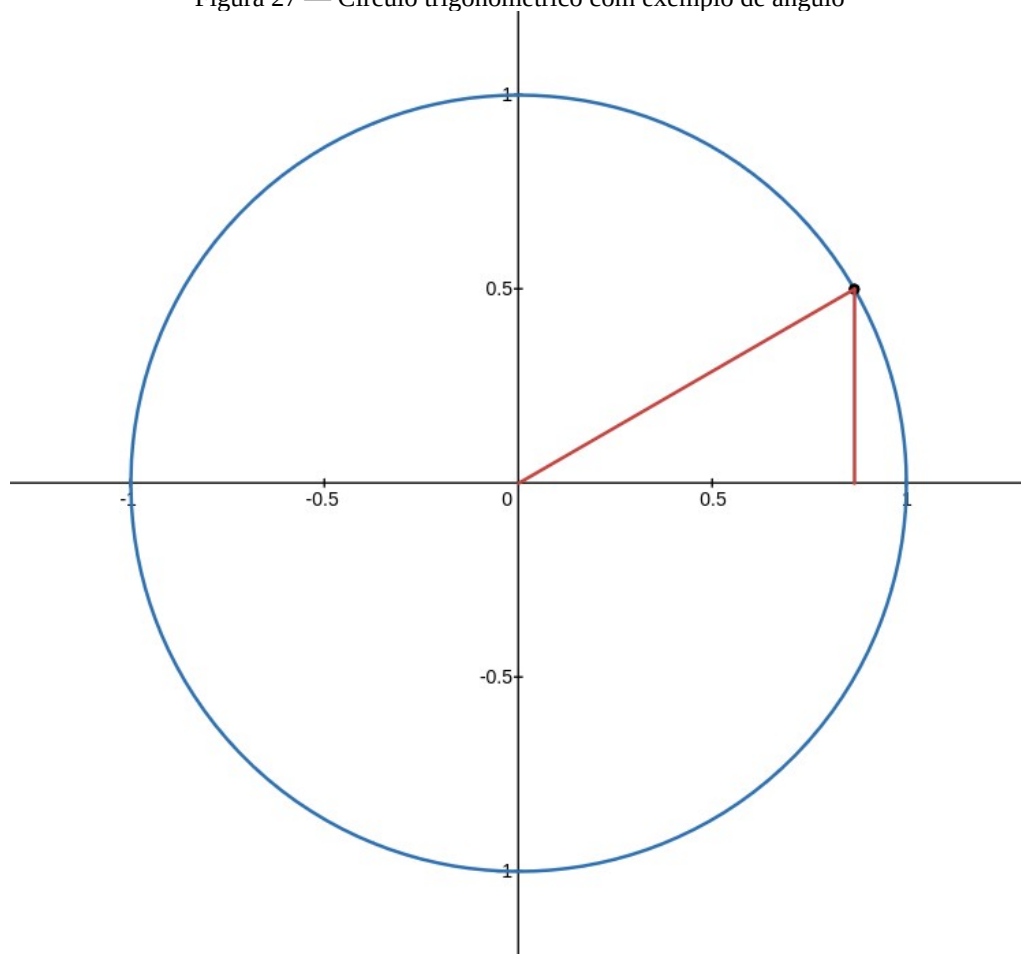


Fonte: Lang (2003).

Este é o tipo de programação que me interessa: aquela embutida na forma da matéria. Percebi que é possível unir componentes eletrônicos, papel e outros materiais laminados à mecânica dos autômatos para criar obras de arte do interesse da minha pesquisa. Porém isto não foi realizado nesta pesquisa, ao menos não da maneira inicialmente imaginada. Conforme já mencionei, esta tese pretende apresentar e deixar registrados todos os passos seguidos dentro do processo criativo que levou ao surgimento do ModoriTuk e por isto sigo aqui apresentando em detalhes os caminhos originalmente previstos e não seguidos. Sendo uma tese que trata exatamente sobre o processo criativo, considero tão relevante discorrer sobre os caminhos interrompidos quanto sobre os detalhes dos caminhos escolhidos.

Uma das fontes que me trouxeram ao conceito de matéria programável são os origamis cinéticos que defino a seguir. Todo origami é feito de dobras e as dobras podem ser de vale ou de montanha. Cada dobra divide o papel entre duas áreas conectadas pelo vale ou pela montanha. Mapeando esta conexão entre duas áreas e uma dobra (seja de vale ou montanha) para dentro de um círculo trigonométrico é possível gerar um modelo mental de uma dobra de origami onde a dobra está no ponto zero e as duas áreas conectadas a ela podem ser compreendidas como um ângulo variável.

Figura 27 — Círculo trigonométrico com exemplo de ângulo



Fonte: Imagem produzida pelo autor através do site Desmos (Calculator, 2025).

Existem padrões de dobras que geram origamis que podem ser manipulados de modo a variar o ângulo entre estas áreas e estes são chamados origami cinéticos.

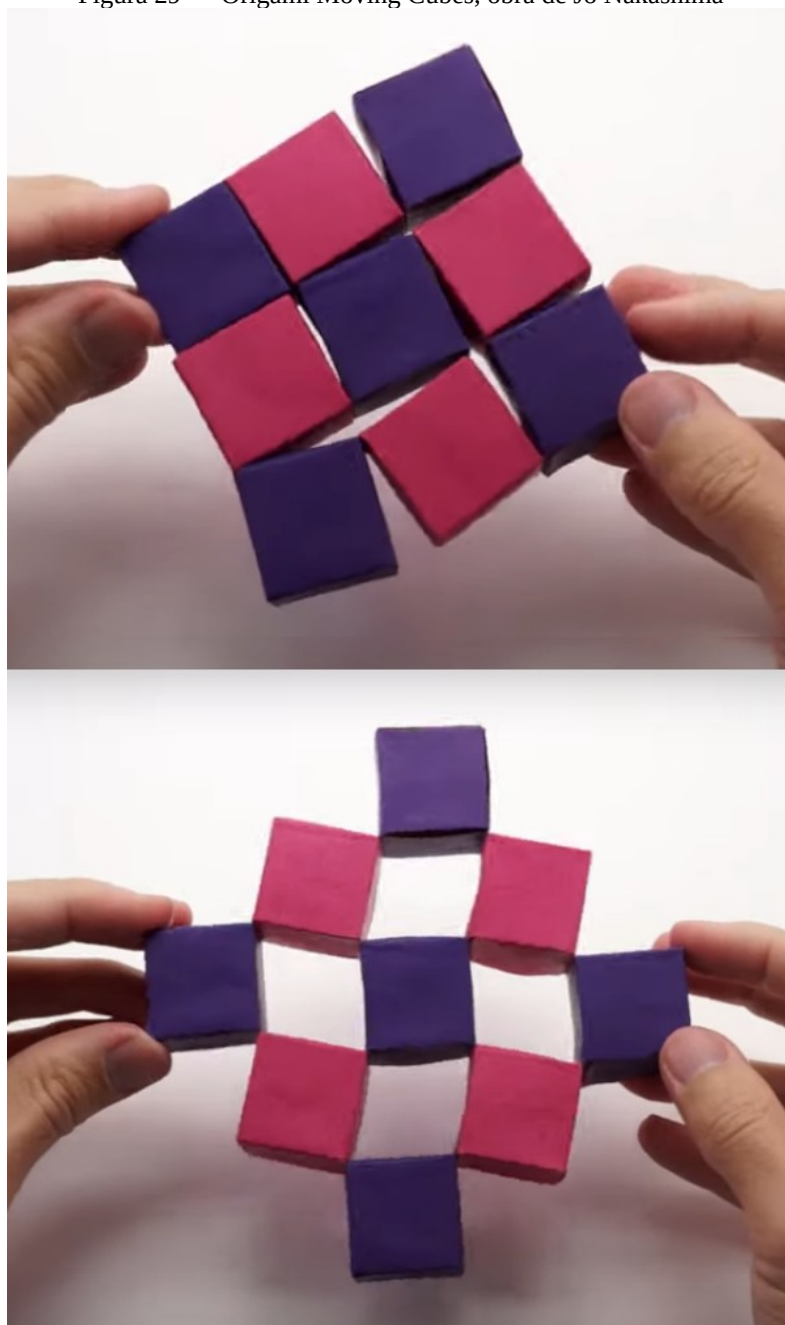
Figura 28 — Origami cinético: pássaro que bate asas



Fonte: Lang (1997).

Este pode ser um pássaro que bate asas quando se move seu rabo como se fosse uma alavanca (Figura 28) ou modelos mais complexos e modulares como os cubos cinéticos do origamista Jo Nakashima (Figura 29).

Figura 29 — Origami Moving Cubes, obra de Jo Nakashima



Fonte: Composição do autor sobre imagens de Nakashima (2019).

Neste modelo de Nakashima (2019), um origami modular e cinético, cada cubo é um origami dobrado a partir de uma folha quadrada, de modo a restarem duas abas que se encaixam nos bolsos de outro módulo. É no encaixe das abas que o vértice (que no modelo de um círculo trigonométrico seria o ponto zero) se torna a conexão entre dois módulos, permitindo o movimento. Ao compreendermos os origamis cinéticos como estruturas que variam seus ângulos conforme regras matemáticas, está aberta a conexão para que estes sejam entendidos como estruturas programáveis.

4.1.2 Autômatos como matéria programável

Em algum momento durante a conclusão do meu mestrado onde pesquisei a relação entre origami e robótica (Moraes, 2018), entrei em contato com estruturas cinéticas denominadas de *karakuri*, ou os autômatos japoneses ancestrais. Entre estes *karakuri* encontrei uma recriação em um dos sites de repositórios com modelos prontos e gratuitos para impressão 3D, o *Thingiverse*. O modelo foi retirado do ar posteriormente, mas eu já havia baixado, impresso e estudado, chegando a diversas conclusões que trouxeram inspirações para o desenvolvimento deste processo. O referido *karakuri* é um boneco de corda que serve chá. Este ancestral dos robôs movia-se de maneira linear de um ponto a outro de uma mesa enquanto levava consigo uma bandeja com um recipiente contendo chá. Ao chegar no outro lado da mesa, o convidado retirava o recipiente da bandeja e, sem o peso do recipiente, a bandeja se movimentava ligeiramente para cima, desconectando duas peças interrompendo o movimento das rodas. Terminado o chá, o convidado devolvia o recipiente à bandeja, reconectando as rodas ao sistema cinético o que permitia que o autômato completasse a sua programação fazendo um giro de 180 graus e seguindo de volta ao anfitrião na outra ponta da mesa (Figura 30).

Figura 30 — Recriação contemporânea do karakuri registrado por Hosokawa Hanzo Yorinao no livro *Karakuri Zui*

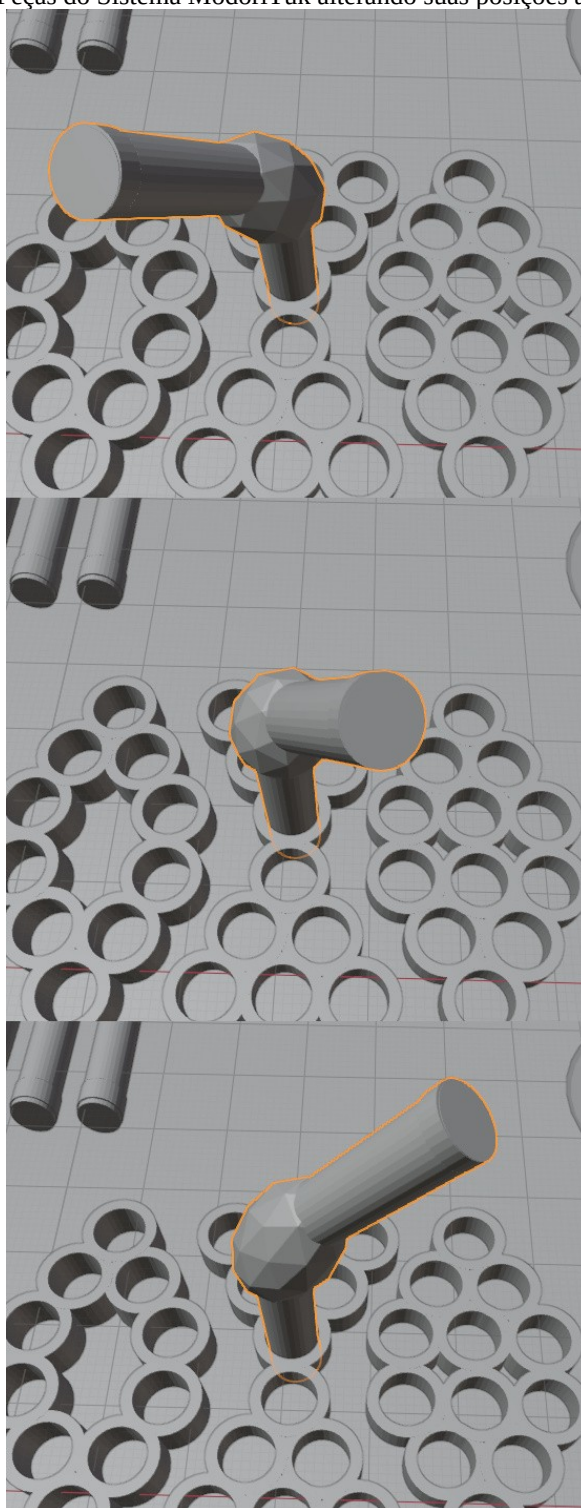


Fonte: Composição do autor de frames de vídeo do canal de Youtube *Plastic Pals* (Ningyo, 2025).

Após entrar em contato com este autômato e estudar o seu funcionamento, percebi algumas semelhanças entre os origamis cinéticos e os autômatos a partir da relação que cada um estabelece com o modelo mental de um círculo trigonométrico. Perceber isso me ajudou a chegar neste conceito que chamei então de programação da matéria. A semelhança entre ambos os sistemas passa pela forma como o movimento é produzido. Os autômatos em geral funcionam a partir do movimento de engrenagens ao redor de eixos. Uma engrenagem costuma ser uma variação da roda e como ela possui um ponto central ao redor do qual ela gira. Da mesma forma um círculo trigonométrico é um modelo que possui um centro ao redor do qual são descritos infinitos ângulos e suas variações.

Ao conectar diversas engrenagens de tamanhos e formas diferentes é possível transmitir a energia dentro do sistema e criar movimentos diversos, mas tudo é ligado a engrenagens que giram em torno de um eixo, um ponto zero, e a variação do movimento forma ângulos que transmitem o movimento. Se a engrenagem estiver ligada a uma haste, esse movimento circular pode ser transformado em outros movimentos dentro de autômatos. Se a engrenagem estiver ligada a uma roda em contato com uma superfície, é o atrito que fará com que o movimento circular da roda somando ângulos (360, 720, etc.) vire um movimento linear na superfície. Estas minhas descobertas são certamente conhecimentos óbvios dentro da engenharia mecânica, mas para mim cada uma delas trouxe e ainda traz novas inspirações para o território da arte tecnológica, onde atuo. Entender que as engrenagens dos autômatos mantém relação próxima com o funcionamento dos motores usados em robótica e fabricação digital é novamente uma obviedade, mas ao mesmo tempo me trouxe epifanias criativas dentro deste processo. Uma das consequências dessas epifanias foi a consciência de que muitos tipos de movimentos podem ser descritos como variações de ângulos seja este movimento o de uma dobra de papel, um movimento de engrenagem, um motor ou uma peça encaixada dentro de outra que é o caso dos módulos que compõe o sistema ModoriTuk (Figura 31).

Figura 31 — Peças do Sistema ModoriTuk alterando suas posições a partir de giros



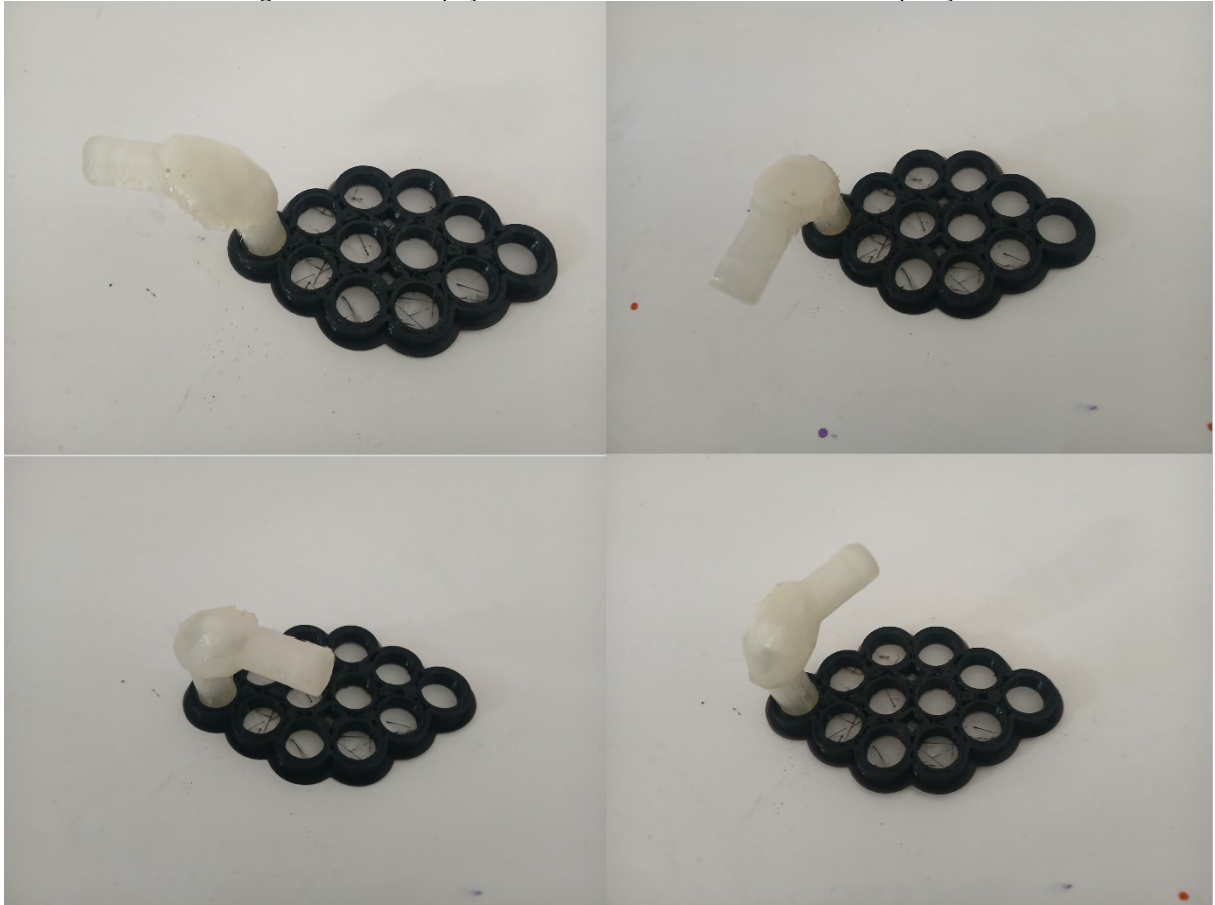
Fonte: Composição do autor, 2025.

4.2 Dos autômatos aos OriBots

O resultado do meu processo criativo e desta pesquisa, o sistema ModoriTuk é um

sistema analógico e interativo e tem o seu potencial de mudança de forma a partir das possibilidades de giro que as peças mantêm umas com as outras (Figura 32).

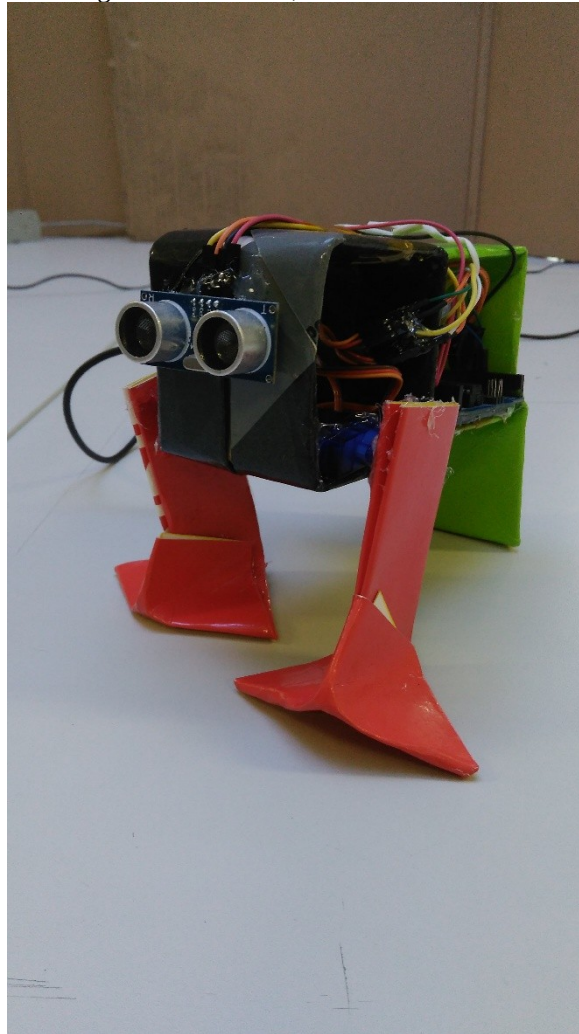
Figura 32 — Duas peças do Sistema ModoriTuk mudando de posição



Fonte: Composição de fotografias do autor, 2025.

Este mesmo princípio do movimento sendo produzido a partir da variação de ângulos é amplamente utilizado em robótica e em fabricação digital. Ambas as áreas são lugares onde sistemas mecânicos se integram a sistemas digitais e nestas áreas o conceito de motores percorrendo ângulos de maneira precisa e aplica continuamente os resultados de operações trigonométricas para obter a programação da matéria. Durante o meu mestrado apliquei esse princípio de controlar os ângulos com que motores variam para controlar elementos mecânicos. Durante a criação e produção dos OriBots (Figura 33) conectei módulos de origami a motores servo produzindo movimentos diversos.

Figura 33 — OriBot, obra de Daniel Seda



Fonte: Fotografia do autor, 2018.

Nos motores servo, utilizados por mim nos OriBots, o movimento era limitado a 180°. Nos motores de passo usados em outras peças que produzi na época, o movimento podia ser contínuo, fosse em uma direção ou na oposta. Em ambos os tipos de motores, o ângulo do eixo pode ser precisamente determinado, produzindo movimentos programáveis. Motores de passo são amplamente utilizados na construção de impressoras 3D e demais máquinas de fabricação digital, como cortadoras laser e roteadoras CNC, exatamente porque podem ser precisamente controlados a cada momento, realizando na prática a tal matéria programável. Como eu já afirmei anteriormente neste texto, é possível entender alguns tipos de matéria programável como um outro nome para robótica. Porém este conceito que venho usando transcende esta área específica e pode ser utilizado para pôr em diálogo outras áreas que não pareciam relacionadas, como as técnicas de origami e a mecânica dos autômatos. Novamente: não consigo, a partir desta pesquisa, afirmar a validade ou utilidade universal deste conceito, posso apenas afirmar

com segurança que o conceito de matéria programável me trouxe a intuição sobre estas relações e me guiaram no caminho da criação do sistema ModoriTuk.

4.3 Dos autômatos celulares à matéria programável

A origem do conceito de matéria programável se confunde com o início da ciência da computação. A ideia de que a matéria pode ser programada para realizar uma função surge dentro do panorama científico do século XX quando John Von Neumann teoriza em 1948 sobre uma máquina autorreplicante. Esta máquina seria capaz de construir uma réplica também autorreplicante. Portanto, o modelo mental de uma matéria programada com potencial de replicação foi criado na primeira metade do século XX. Devido à impossibilidade tecnológica do momento em que foi proposta, tal ideia só começa a ser retomada no fim do século, na década de 90. No entanto, já no momento histórico em que estava e a partir desta impossibilidade prática da aplicação do conceito, Von Neumann se dedica a criar um modelo teórico de tal máquina partindo de uma sugestão de Stanislaw Ulam. O trecho abaixo traduzido por mim menciona este momento notório da história da computação:

De acordo com a sabedoria recebida, foi o matemático polaco-americano Stanislaw Ulam que sugeriu a von Neumann que tentasse construir o seu autômato autorreplicante utilizando o quadro conceitual do que é hoje conhecido como autômatos celulares (Schiff, 2006).

Com esta proposta teórica, von Neumann se torna o primeiro cientista da computação a propor algum modelo computacional com regras que permitiriam uma transformação autônoma, generativa dos elementos dentro deste modelo. A aplicação real desta ideia só vai acontecer e se desenvolver em meados dos anos 60 quando o desenvolvimento dos computadores permite o surgimento das CAM, *Cellular Automata Machines*. Máquinas de autômatos celulares são mecanismos de simulação computacional em que cada ponto de uma rede pode assumir certas propriedades variáveis. Cada ponto varia ou não sempre em relação aos pontos imediatamente vizinhos a si mesmo. A ideia foi popularizada durante os anos 70 através de um destes modelos criado por John Conway, o Jogo da Vida. É um jogo onde o único movimento do jogador é lançar as primeiras peças dentro de uma simulação computacional composta por um tabuleiro bidimensional que pode se estender ao infinito com casas de mesmo tamanho. O jogo pode ser feito de forma simulada em um computador ou de forma real usando

um papel quadriculado e um lápis e borracha. Foi criado inicialmente em um tabuleiro de Go. Suas regras são simples e dão uma boa ideia de como funcionam os autômatos celulares. No Jogo da Vida há o tempo e o estado das células. O estado das células varia conforme o tempo passa. A simulação começa com um dado estado de células cheias e de células vazias. Quem escolhe qual está de que maneira é o jogador, mas este estado inicial também pode ser gerado randomicamente. Conforme o tempo passa a simulação muda de estado e a cada instante cada célula permanece viva (cheia), morre (fica vazia) ou dá origem a outras células que se tornam cheias. Uma célula vazia se torna cheia caso esteja cercada por exatamente três de suas oito vizinhas. Cada célula permanece viva pra próxima geração se duas ou três de suas vizinhas estiverem vivas, qualquer outro estado ela morre. É como se uma célula sozinha morresse de solidão e mais de três células morressem de superpopulação. Depois que o estado inicial é escolhido pelo operador essas mesmas regras são aplicadas de novo e de novo a cada geração.

Autômatos celulares podem ser especificamente programados para testar hipóteses em pesquisas, simular o comportamento de partículas, de cardumes, de insetos, etc. A criação destes modelos e sua pesquisa mostra que complexos ecossistemas podem surgir a partir de regras simples e isto também ajuda a entender tamanha diversidade na biologia e na natureza em geral sem fazer uso de nenhum conceito metafísico, partindo apenas de uma dada estrutura inicial arbitrária e de regras para as relações entre elas. No Jogo da Vida surgem, neste tabuleiro infinito e a partir de estados randômicos, estruturas que se deslocam, estruturas que disparam outras, que dão origem a outras formas de maneira periódica, mas também acontecem estruturas que se conformam e permanecem estáveis, mortas. Além de Conway, outros cientistas propuseram modelos de autômatos celulares, entre eles a dupla Margolus e Toffoli, que, em 1991, publicou um artigo trazendo pela primeira vez a expressão Matéria Programável. Neste artigo, eles expandem o conceito e imaginam como seria criar algo similar, porém com muito mais resolução do que os modelos até então criados. O artigo “Programmable Matter: Concepts and Realization” (Margolus; Toffoli, 1991) tem por abstract simplesmente a seguinte frase: “This paper is a manifesto, a brief tutorial, and a call for experiments on programmable matter machines.” Apesar do nome promissor, a estrutura que o artigo descreve como matéria programável ainda é apenas uma estrutura computacional capaz de simular o comportamento de partículas reais muito melhor do que qualquer outra Máquina de Autômatos Celulares até então. A matéria programável no sentido que me interessa para minha pesquisa surge apenas em 1994 com Seth C. Goldstein que finalmente inicia uma pesquisa propondo a criação de uma matéria

programável a partir de componentes eletrônicos atuando no mundo físico. Deste artigo trago o trecho traduzido por mim:

[...] a matéria programável é definida como uma conjugação ciberfísica: “[...]a matéria programável nos permitirá dar um (grande) passo para além da realidade virtual, para a realidade sintética, um ambiente em que todos os objetos num ambiente de usuários (incluindo os inseridos pelo computador) são fisicamente realizados” (Bourgeois *et al.*, 2019).

E em 2006 um outro artigo de Goldstein, em coautoria com Peter Lee, Jonathan Smith e Tom Wagner, descreve essa matéria como sendo um material físico composto de um grande número de dispositivos submilimétricos com capacidade de processamento e sensores. A matéria programável ideal, portanto, seria uma matéria reconfigurável, composta de unidades programáveis e reprogramáveis com o potencial de assumir qualquer forma no mundo real. Um sistema destes com a resolução ideal seria algo como o T-1000, o robô fluido da sequência de O Exterminador do Futuro (Figura 34).

Figura 34 — Robô T-1000, personagem do filme O Exterminador do Futuro: O Dia do Julgamento

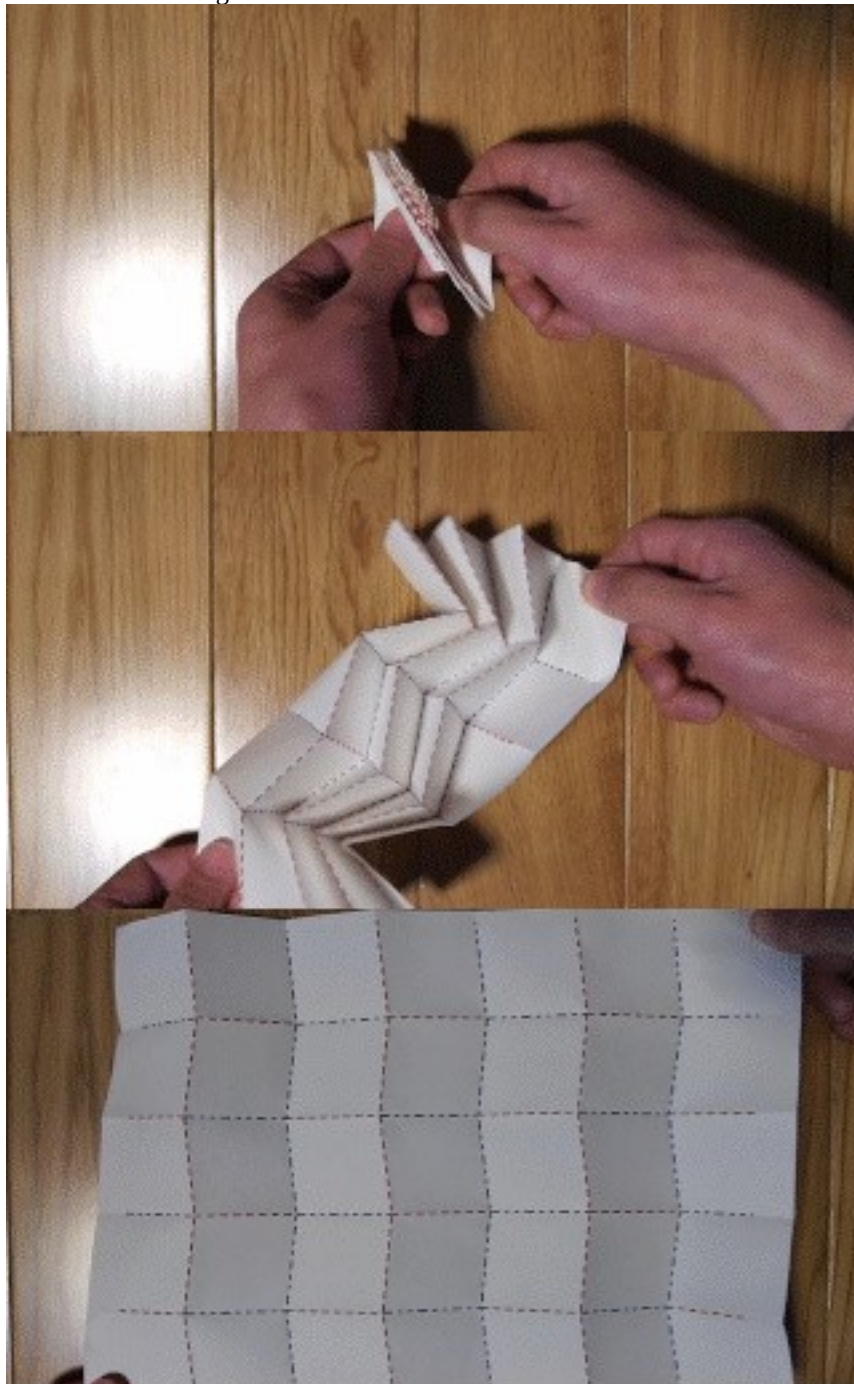


Fonte: T-1000 (2025).

Curiosamente este filme foi lançado em 1991, um ano depois da escrita do artigo de Toffoli e Margolus, embora antes de sua publicação em 1993. Esta coincidência de datas me leva ao questionamento se o roteirista do filme teve acesso ao artigo ainda inédito ou se de algum modo entrou em contato com a ideia. Nada impede, porém, que ambos apenas tenham apenas captado o espírito da época dentro da efervescência gerada pela rápida expansão dos computadores pessoais nas décadas de 80 e 90. O mesmo Seth Goldstein, alguns anos depois, dá

início ao projeto *Claytronics*, em uma tentativa de realizar esta ambição. O projeto *Claytronics* passa a ser desenvolvido em uma parceria entre Harvard e a Intel, mas, apesar de ambicioso não apresenta resultados públicos há muito tempo. As pesquisas que mais se aproximam de uma matéria programável como sugerida pelos artigos de Goldstein (2004, 2006) surgem dentro do laboratório de inteligência artificial do MIT, o CSAIL, não relacionado com ele. Existem pelo menos dois projetos liderados por Daniela Rus e que dialogam com a proposta de matéria programável. Um deles desenvolve uma abordagem inspirada nos origamis rígidos, herdeira da tradição iniciada pela dobra Miura, para criar superfícies que podem ser mapeadas e ativadas eletromagneticamente para gerar topologias específicas (Figura 35).

Figura 35 — Três momentos da dobra Miura

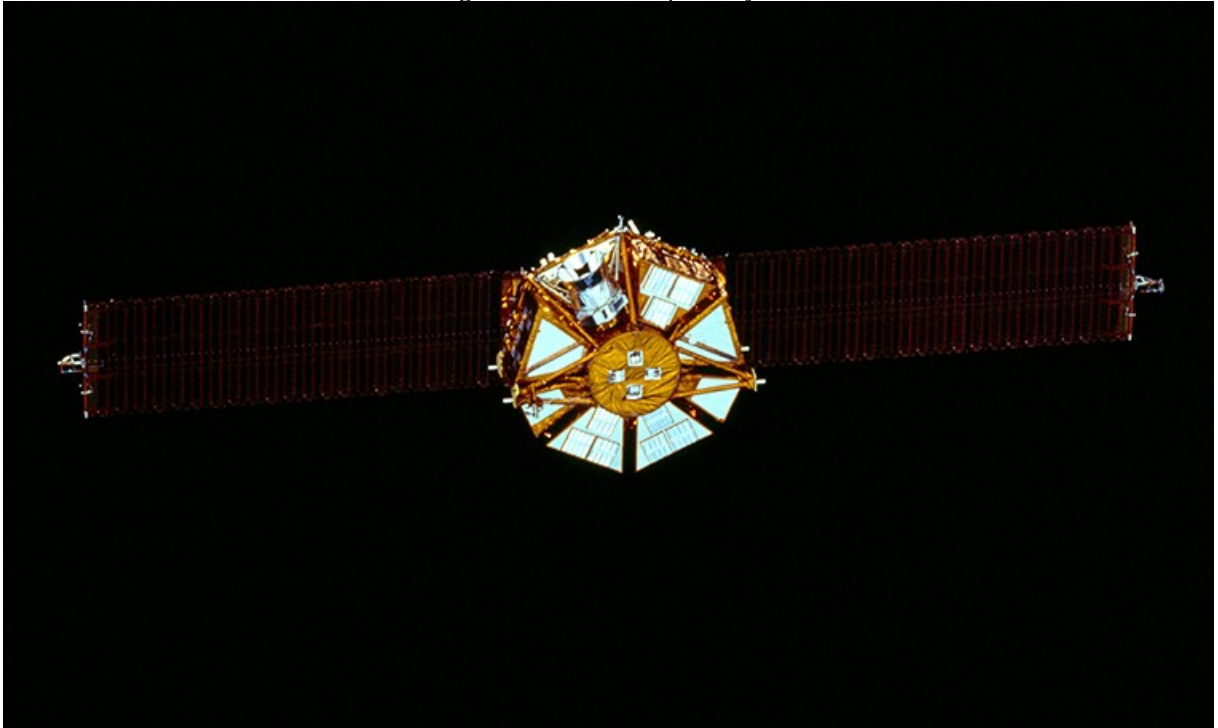


Fonte: Composição a partir de Miura fold (2025).

A técnica de aplicar métodos de origami em superfícies e materiais não-dobráveis foi proposta em um artigo de Koryo Miura em 1985. A missão de Miura (1985) era desenvolver uma forma de levar para o espaço grandes estruturas de painéis solares articuladas e dobráveis. Miura (1985) cria esta dobra específica que, aplicada em uma superfície, a torna capaz de ser aberta e fechada com o mínimo de energia e apenas dois pontos de apoio. Os painéis retráteis

assim desenvolvidos serviram para equipar a sonda Space Flyer lançada ao espaço 10 anos depois em uma missão de um ano (Figura 36) .

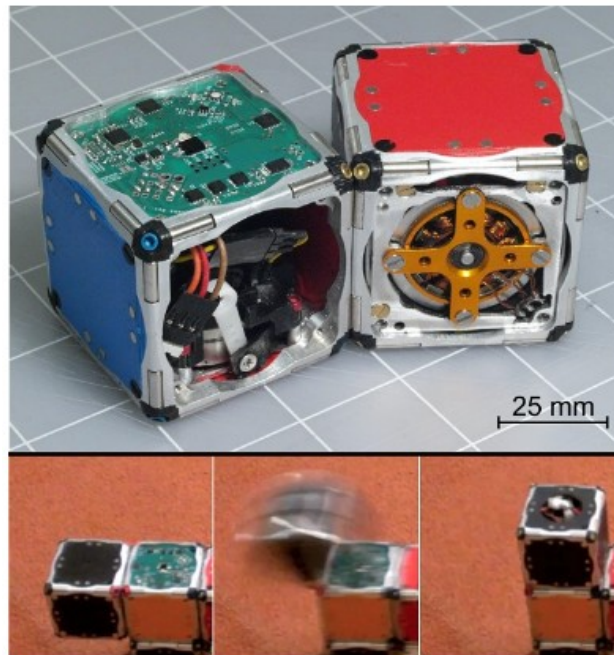
Figura 36 — Sonda Space Flyer



Fonte: Garcia (2017).

A dobra Miura também popularizou a ideia de origami rígido: aplicar a técnica do origami a materiais laminares não flexíveis. O origami rígido vai inspirar algumas pesquisas do CSAIL-MIT e parece ser a técnica mais bem sucedida até agora de criar alguma matéria programável. O outro projeto do mesmo laboratório desenvolve uma abordagem modular. Composta por pequenos blocos magnéticos que estão mais próximos da proposta original de matéria programável lançada por Goldstein, embora esta pesquisa não tenha nenhuma relação com este autor. A pesquisa do MIT gera, em 2013, os M-Blocks (Romanishin; Gilpin; Rus, 2013), um dos projetos mais bem sucedidos até aquele momento dentro desta tentativa de criar uma matéria programável modular no mundo real. Composta de cubos com arestas parcialmente magnéticas, sem nenhuma parte móvel externa e com motores internos capazes de gerar *momentum*, estes cubos giram para produzir deslocamento e se conectam a outros construindo formas no mundo real como se fossem minúsculas peças de lego robóticas.

Figura 37 — M-Blocks



Fonte: CSAIL-MIT.

4.4 Matéria programável na criação artística

Agora analiso algumas das influências que outras obras de arte cinéticas exerceram sobre o processo criativo do qual trata esta tese.

Outra referência importante sobre a relação com estruturas que mudam de forma é o trabalho de Lygia Clark. Um interesse específico causado por uma semelhança incidental pois como consequência imprevisível da minha pesquisa de mestrado (Moraes, 2018), percebi uma semelhança formal do que pesquiso com alguns aspectos da obra da Lygia Clark. Não foram poucas as pessoas que fizeram menção à sua obra ao visitarem a minha exposição com os resultados da pesquisa de mestrado, em 2018. No entanto, em nenhum momento, pensei ou parti da artista para desenvolver os objetos em questão, um deles apresentado na figura acima, que surgiram de uma necessidade formal e estrutural da minha pesquisa e a partir das questões próprias do origami e da robótica. Após entrar em contato com a parte teórica dos estudos do origami, descobri que o momento em que a obra de Akira Yoshizawa (1987) ganhou popularidade no mundo, o final da década de 1950, foi justamente a época de formação da geração de artistas da qual Lygia Clark faz parte. Fiquei interessado em verificar essa hipótese, a saber, que Lygia Clark tenha sido influenciada pela obra de Yoshizawa — ou seja, pelo origami — para desenvolver as suas peças interativas mais famosas, os *Bichos*. E este é outro

ponto que consegui investigar durante este doutorado. E pelas evidências que levantei, Lygia não precisava ter sido influenciada pelo origami para criar os *Bichos*: na obra de Lygia a forma tridimensional nasce da multiplicação dos planos que a artista obtém diretamente a partir da pintura. Ela destaca os planos e os contrapõe, criando um espaço tridimensional manipulável. Portanto, Lygia Clark não foi influenciada de modo consciente pelo origami — e se foi, não deixou registro disso, embora não se possa descartar a hipótese de que ela tenha entrado em contato com a técnica através de alguma revista da época, ou viagem realizada, ou aula enquanto criança, etc. Este tema foi abordado em um artigo escrito por mim e que foi apresentado no Congresso 24.ART em Brasília em setembro de 2025²².

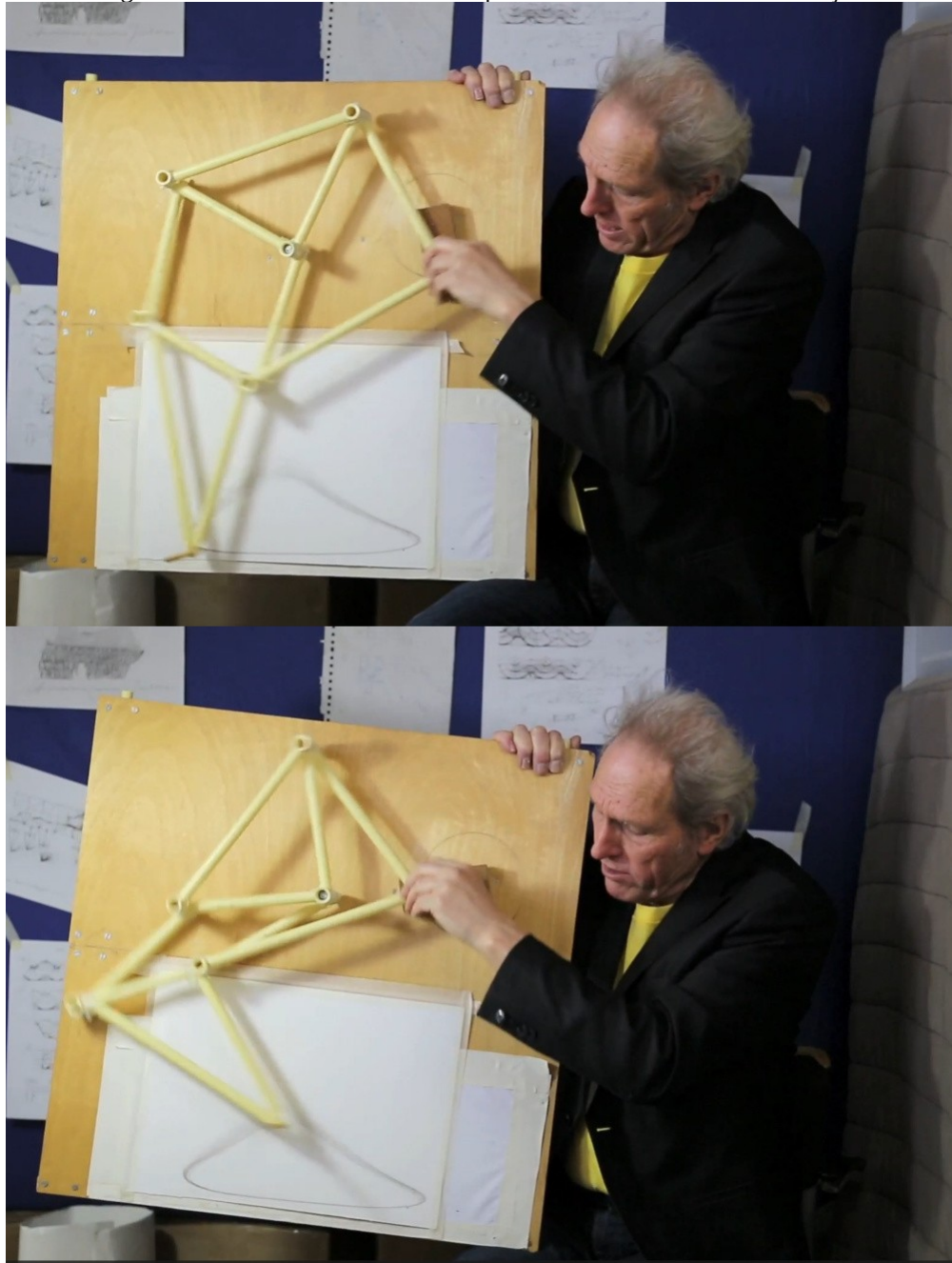
Outra grande influência dentro dos artistas contemporâneos que muito me influenciaram e terminaram por contribuir para a criação do ModoriTuk foi o artista holandês Theo Jansen. Jansen trabalha desde a década de 90 com esculturas cinéticas que captam a energia do vento e a transformam em movimento. São modelos analógicos feitos com materiais comuns e a engenhosidade de sua realização é fascinante e arrebatadora como deve ser uma grande obra de arte. Apresentadas em espaços naturais, em geral na beira de uma praia, os Strandbeests (Engelen, 2015; Jansen, 2022) dialogam imediatamente com grandes temas da nossa época: ecologia, tecnologia, impacto humano na natureza muito embora não sejam diretamente sobre nada disso. Em última análise são apenas obras mudas de arte cinética dispostas no espaço público. Os Strandbeests de Jansen (2022) vêm sendo produzidos em uma linha evolutiva, em que cada geração é usada pelo artista para testar novas ideias e aumentar a complexidade da criatura. As criaturas de Jansen são feitas de canos de PVC conectados, formando estruturas abertas por onde o vento atravessa. Os Strandbeests (Engelen, 2015; Jansen, 2022) têm o movimento programado na própria estrutura como um autômato. Ao contrário de muitos autômatos, ele não funciona com molas que acumulam energia transferida manualmente por um operador humano e sim com a energia captada naturalmente pela criatura sem auxílio de nenhuma bateria convencional e nenhum outro componente elétrico ou eletrônico. As estruturas possuem bandeiras ou asas que captam a energia do vento e a transferem para garrafas PET que acumulam este vento funcionando como se fossem baterias. Jansen (2002) as chama de “estômagos”. Estas garrafas vão acumulando o ar com alta pressão para enfim redirecionar para as pernas através de um eixo central que atravessa a criatura, conectado a todas as pernas. Conforme a explicação presente no site oficial do projeto e traduzida por mim, os Strandbeests

²² Disponível em: <https://www.even3.com.br/23-art-encontro-internacional-de-arte-e-tecnologia-exposicao-emmeio16-439377/>. Acesso em: 2 jun. 2025.

são “esqueletos feitos de tubo de plástico amarelo (tubo de eletricidade holandês)[,] são capazes de andar e obtêm a sua energia do vento. Evoluíram desde a sua criação em 1990 e foram divididos em 12 períodos de evolução” (Jansen, 2022).

As criaturas seguem em evolução e as esculturas de Theo Jansen são uma realização artística que se baseia fortemente em procedimentos científicos desde a sua origem. Segundo conta o próprio artista no site do projeto (Jansen, 2022), a ideia surgiu quando ele era colunista em um jornal nos anos 80 e escreveu um artigo de fantasia imaginando esqueletos gigantes dispostos na praia que usariam o vento para criar dunas e proteger o território do país da invasão das águas. O artista ficou fortemente influenciado pela imagem e inspirado pelo próprio artigo resolveu fazer experimentos reais com tubos de plástico. Já tendo uma atuação e algum renome local como artista plástico, Jansen partiu visando a construção de alguma criatura e se propôs o prazo de um ano experimentando com o material. Esse um ano acabou se tornando uma experimentação de décadas e sem prazo para terminar. E na prática aquela imagem mental de pura imaginação sobre esqueletos que usavam vento para criar dunas, acabou por dar início à materialização de um processo criativo que em muitos momentos se aproxima deliberadamente da evolução natural realizada pelas espécies vivas ao longo do tempo. E isto desde a concepção da forma como elas se deslocam pois em determinado momento deste processo criativo Jansen decidiu dar movimento às suas esculturas de esqueletos de tubos plásticos e para isto precisou criar um sistema de movimentação que as conectasse ao vento. Primeiro criou um esqueleto de pernas articuladas onde cada cano fica ligado a outro através de um eixo que permite o movimento entre ambos. Este modelo de perna poderia ter infinitas variações e cada variação poderia gerar um tipo de movimento diferente (Figura 38).

Figura 38 — O artista Theo Jansen explicando o mecanismo de sua criação

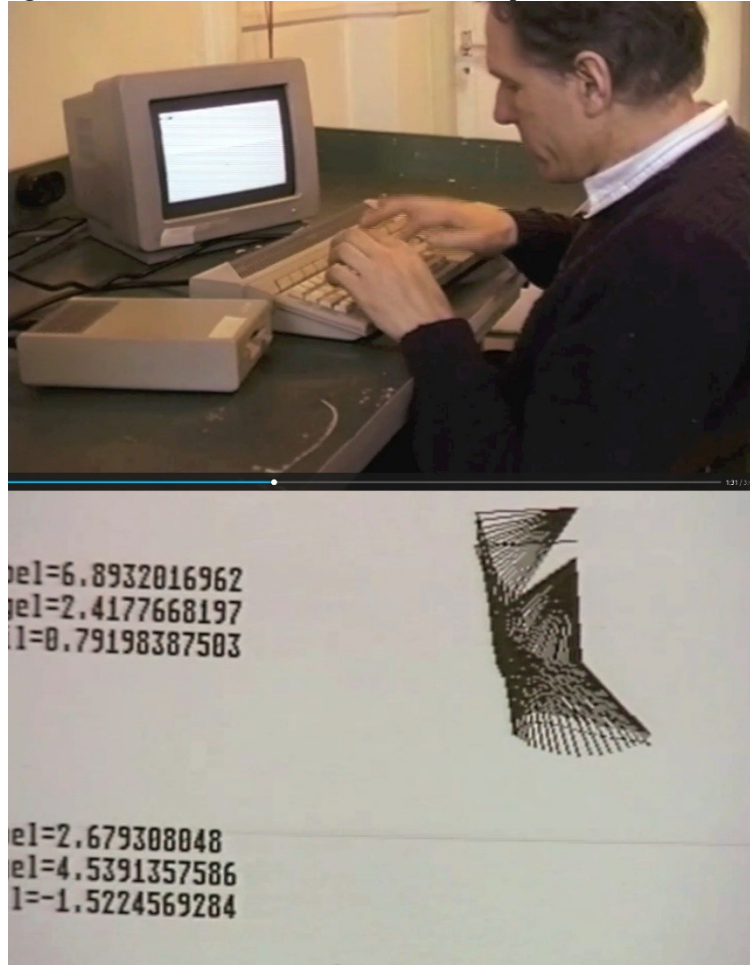


Fonte: Composição do autor sobre vídeo no site do artista (Jansen, 2022).

Ao invés de testar fisicamente estas possibilidades, Jansen então escreveu um programa de computador para a máquina que usava na época, um Atari ST (Figura 39), e, através deste programa, em 1990, criou um algoritmo que produzia uma evolução dos modelos de pernas para a sua escultura cinética. Em outras palavras, ele simulou um processo evolutivo cujo objetivo era criar um modelo de perna que gerasse uma curva específica. O modelo de curva que o artista buscava deveria ter a parte inferior o mais plana possível. Assim a criatura teria um movimento

estável quando caminhasse pela areia plana das praias holandesas.

Figura 39 — Desenvolvimento de um software pelo artista Theo Jansen



Fonte: Composição do autor sobre vídeo do artista Theo Jansen, 2025.

Para complementar esta pesquisa, parti em busca do artigo original da década de 80 que inspirou a série de criaturas. Em uma busca nos arquivos do jornal que estão disponíveis na internet o artigo mais antigo localizado por mim

Tentando sem sucesso localizar o artigo original que inspirou Jansen (2003) em seus processos criativos encontrei outro artigo mais recente que contém o seguinte trecho²³:

Uma lagarta muda de forma, uma minhoca, até mesmo um ser humano andante muda de forma. É a isto que todos os modos de locomoção se resumem: mudar de forma ou mover-se de tal forma que ocorram mudanças repetidas na forma que resultem em deslocamentos repetidos. Os movimentos repetidos somados produzem um movimento total de A para B.

²³ Trecho original em holandês, selecionado por mim e traduzido através de tradutor online.

Nas obras cinéticas de Jansen, assim como acontece nos autômatos, a função de cada parte da estrutura está intimamente ligada à mudança de forma para que a obra agregue a função de deslocamento às suas possibilidades. Esta mudança de forma só é possível devido à articulação entre as partes. E esta articulação por sua vez também pode ser descrita a partir das variações de certos ângulos como no modelo já citado de um círculo trigonométrico. E também como nos autômatos é a introdução de energia no sistema que resulta no movimento. Os Strandbeests, como são chamados, começam a serem desenvolvidos a partir de 1990 e desde então seguem sendo desenvolvidos e incrementados pelo artista que planeja dar-lhes cada vez mais autonomia de comportamento.

Theo Jansen pretende que seus Strandbeests sejam formas de vida artificiais, mas tem consciência de que eles estão muito longe disto.

A arte é pioneira no desenvolvimento de sistemas de programação da matéria. Primeiro com os origamis inspirando a criação da dobra Miura em 1985. E depois com as obras de Theo Jansen a partir de 1990.

No final da década, em 1999, o artista Daniel Rozin começa a desenvolver uma série de obras eletrônicas interativas que oferecem uma versão artística aproximada do conceito de matéria programável. Na primeira obra da série de espelhos interativos uma matriz de “pixels” formada por blocos de madeira reproduz ao vivo uma versão em baixa resolução da imagem do visitante que se coloca diante da obra (Rozin, 1999). A imagem captada por uma câmera instalada no meio da obra é traduzida em blocos de madeira que giram no eixo horizontal. A luz instalada sobre a obra amplia o efeito transformando os blocos de madeira em uma tela de pixels físicos. A mudança de posição de cada bloco individualmente gera uma mudança na imagem que é vista pelo visitante e interator. Esta obra é apenas o início de uma longa série de espelhos interativos feitos com os mais diferentes materiais. A série já seria impressionante por si mesma, mas o fato de ter sido iniciada antes do advento do Arduíno, hardware aberto que facilitou a criação de obras interativas a partir de 2005, a torna ainda mais digna de admiração.

No campo da escultura cinética analógica, não eletrônica, está o trabalho do artista sueco Erik Åberg. Suas esculturas são compostas de módulos que se articulam e mudam de posição relativa gerando um todo que funciona como um origami se dobrando e desdobrando. Segundo o próprio, em citação presente no site do projeto e aqui traduzida por mim:

O GHOSTKUBE é uma escultura inspirada no origami em movimento. É constituída por cubos ligados numa estrutura tridimensional. Pode ser manipulado para mudar de

forma de diferentes maneiras. É feito de um sistema de peças que se encaixam umas nas outras. Quando quiser experimentar outro desenho, basta desmontá-lo e construir outro com exatamente as mesmas peças (Åberg, 2020).

O projeto de Åberg começa a ser desenvolvido em 2010 e precisou de anos de pesquisa para atingir a forma em que foi lançado numa plataforma de *crowdfunding* em 2018. Curiosamente, o brasileiro Jo Nakashima criou no ano seguinte uma série de obras de origamis modulares que se assemelham ao movimento das esculturas de Åberg. Com a diferença que, seguindo a tradição do origami, o projeto de Nakashima é de código-aberto e alguns tutoriais de como construir seus cubinhos articulados de papel estão publicados em seu canal no Youtube (Nakashima, 2019), permitindo a qualquer pessoa refazê-los de maneira simples e barata. Nakashima publica regularmente em seu canal no Youtube diversos tutoriais de seus origamis autorais, alguns deles de peças modulares que podem ser associadas à noção de matéria programável. E ainda dentro da técnica e arte do origami, a pesquisadora brasileira Thais Ueno Yamada (2016) usa a própria dobra Miura para criar painéis dobráveis feitos de lâminas de bambu. Os resultados de sua pesquisa foram publicadas em sua tese de doutorado em 2016.

4.5 Imaginando modelos de matérias programáveis

Dentro da minha investigação teórica e prática sobre o tema, comecei a pensar em como seria possível criar algum tipo de matéria programável, mas partindo de um sistema relativamente simples e de baixo orçamento. Entre os inúmeros exercícios de criação de modelos mentais que pensei, finalmente, ao longo de seis meses, entre os anos de 2020 e 2021, consegui realizar um sistema desses a partir da combinação entre softwares livres e fabricação digital e chamei deste sistema de ModoriTuk.

Todas estas pesquisas artísticas e científicas vêm me inspirando e me informando quanto à possibilidade de algum modelo de matéria programável, ou algo semelhante, ser criado a partir de materiais baratos e publicado num formato de código aberto. Antes da proposta de uma matéria programável autoral, no entanto é preciso evocar a estrutura computacional fundadora de nossa época, a Máquina de Turing, modelo computacional universal que pode ser atualizado de inúmeras formas. A Máquina de Turing consiste em um método de leitura e de escrita de informações, uma máquina de computação universal teórica construída com algumas regras: há uma fita infinita que pode deslizar para os dois lados, há uma cabeça com capacidade de gravar 0 ou 1 na fita e essa cabeça também pode armazenar alguns modos diferentes de agir. De modo

que, cada vez que a cabeça age, a informação na fita pode ser lida, escrita ou reescrita. A combinação de vários módulos com esse funcionamento básico gera qualquer informação digital caso haja módulos em número o suficiente.

Agora proponho um exercício de imaginação. Vamos imaginar que o mundo inteiro possa ser encarado como uma Máquina de Turing potencial. Dentro dela, podemos criar regras arbitrárias em que, em vez de uma fita infinita há o espaço com seus objetos, em vez de casas com potencial de serem 0 ou 1 temos objetos que podem mudar de estado e, no lugar de uma cabeça que atualiza a informação, temos qualquer operador capaz de fazer um objeto mudar de estado, seja este operador humano, animal ou máquina. Esse sistema pode ir ligando e desligando objetos no mundo real e, se estes objetos forem capazes de estabelecer relações entre si, você pode ter no mundo uma espécie de grande computador analógico. A ideia do mundo inteiro como um computador é apresentada de maneira satírica na série *Guia do Mochileiro das Galáxias* (Adams, 2016), em que a Terra inteira seria um computador projetado por uma espécie multidimensional que nos estuda sob a forma de ratos de laboratório. Este modelo também ecoa a percepção de que uma matéria programável ideal seria indistinguível de uma forma viva. De maneira geral, matéria programável seriam estes objetos com potencial de mudança de forma de acordo com a função desejada. Quando aplicamos esse conceito ao longo da história, começamos a encontrar matérias programáveis analógicas ao longo de toda a história da engenharia, da arte e do design. Uma simples cadeira de praia se encaixa dentro deste conceito, bem como qualquer guarda-chuva comum. Ambos os objetos possuem dois estados, que poderíamos chamar de ligado/desligado ou operacional/arquivado, etc. De acordo com a função desejada para o momento, o objeto tem a sua forma alterada para interagir com um operador humano. Novamente me vem a questão incômoda de que um conceito tão amplo pode acabar não sendo útil para nada. Então qual seria a vantagem de aplicar um conceito oriundo da ciência da computação a objetos analógicos? Uma primeira vantagem seria poder estender o pensamento computacional para o mundo físico, trazendo junto com ele todas as possibilidades das linguagens de programação. Esse conceito pode ser útil neste momento pós-digital, no qual, depois de o mundo inteiro ser digitalizado, o computador começa a ser incorporado por objetos do mundo real a partir da inserção de placas de uso genérico como Arduino, ESP8266 ou outras placas específicas conectadas com dispositivos de entrada (sensores de todos os tipos) e de saída (motores, luzes, câmeras, dispositivos de som, etc). Ao mesmo tempo em que o computador na forma de circuitos eletrônicos é incorporado nos diversos objetos reais, a maneira de pensar

digital passa a ser aplicada na realidade. Deste modo expande-se o conceito de robótica, em geral aplicado a objetos únicos, e obtém-se uma robótica incorporada potencialmente a qualquer espaço podendo incluir todos os objetos dentro deste espaço. Este tipo de expansão também pode ser chamada de *cybermatics* (Ning *et al.*, 2015).

O potencial de programação da matéria do mundo real de um ponto de vista *cybermático* vem sendo explorado por toda parte há décadas, e isto abrange desde as portas que abrem sozinhas, luzes que acendem a um bater de palmas até potenciais revestimentos acústicos modulares em salas de espetáculo que poderiam ser usados para um controle mais preciso e adequado para cada atividade ali realizada.

É essa possibilidade de escrever regras de transformação da matéria sob vontade que estou chamando de programação da matéria. Esta transformação pode ter um caráter de mudança de forma, cor ou função. Pode ser aplicada em diversos tipos de matéria, viva ou inanimada, e pode ou não ter o auxílio de eletricidade, mas certamente faz uso de alguma energia para criar movimento. É uma matéria modelável pelas mãos e a vontade humanas ou manipulável por motores ou reações químicas. Uma robótica expandida, incorporada nas coisas e controlável. Robótica das coisas, mas sem necessariamente ser eletroeletrônica expandindo metaforicamente o conceito de robótica para sistemas mecânicos que possam ter sua forma alterada de acordo com a função a ser realizada em um dado momento. O horizonte último da matéria programável pode ter pelo menos dois modos. Um é o robô: sistema cibernético pluripotente e servil, submisso à vontade humana. O outro é a própria matéria viva enfim programável. Ao invés de máquinas, sistemas biológicos. A consequência da edição de genes a partir da aplicação da técnica CRISPR (Vasconcelos; Figueiredo, 2015), mas em níveis exponenciais. Um exemplo deste último modelo se encontra no livro de Harry Harrison (1986), *A Oeste do Éden*. Na saga de ficção científica, os dinossauros, ao invés de se extinguirem, evoluem inteligência e desenvolvem uma tecnologia biológica avançada que permite a esta espécie de lagartos viajar em navios submarinos que na verdade são imensos seres marinhos transformados via tecnologia biológica. Termino com duas citações que dialogam entre si e com tudo o que foi apresentado neste artigo. A primeira delas é um pensamento de Alan Kay (*apud*, Guzdial, 2010), um importante cientista da computação, em tradução minha:

1. a matéria pode ser levada a recordar, discriminar, decidir e fazer
2. a matéria pode recordar descrições e interpretá-las e atuar com base nelas
3. a matéria pode guardar e interpretar e atuar com base em descrições que descrevem tudo o que a matéria pode fazer.

E a outra de pesquisadores brasileiros ligados ao CESAR, centro de pesquisa brasileiro, aqui em tradução minha:

Em um momento em que algumas das mais importantes mentes científicas do mundo acreditam que o universo, incluindo todas as coisas, inanimadas ou vivas, não só se baseiam em código, mas são de fato código, funcionando em plataformas aparentemente diferentes, mas que, no fim de contas, se baseiam muito provavelmente no mesmo conjunto básico de construções universais, não podemos evitar começar a pensar em todo o tipo de coisas como sistemas de informação (Meira *et al.*, 2016).

4.6 Criação do ModoriTuk como matéria programável

No último trecho deste capítulo, volto detalhadamente ao processo de criação do sistema modular desenvolvido durante esta pesquisa, mas agora com foco no conceito de matéria programável. O sistema que eu denominei ModoriTuk é o principal resultado prático desta pesquisa, cumprindo um dos objetivos deste processo de 5 anos.

O nome veio da união do boneco Tuk, inspirado pelo *Playmobil*, cuja criação já descrevi no capítulo 3 e será novamente abordada mais adiante. O boneco ganhou o nome de Tuk por nenhum motivo particular, foi uma palavra que me surgiu. Adotei o nome por ser algo simples e simpático, quase uma onomatopeia. Quando criei um dos módulos que considereei o mais versátil, conforme já descrito no capítulo 3, dei a ele o nome de Módulo Tuk ou ModTuk. A partícula Ori entrou para deixar inscrita no nome a origem do sistema: os origamis modulares. Daí temos ModoriTuk.

O ModoriTuk é o resultado prático mais importante deste processo de criação que materializa o conceito de matéria programável, ponto de partida da pesquisa. A criação do ModoriTuk se inicia com meus estudos sobre origami a partir de 2011. Naquele momento o meu foco era no aprendizado desta técnica de origem principalmente japonesa.

Esta aproximação em relação à técnica do origami já está parcialmente descrita em um dos capítulos do meu mestrado, concluído e publicado em 2018 (Moraes, 2018).

A partir do estudo do origami, cheguei a um conjunto de quatro módulos interconectáveis. Cada um destes módulos teve uma origem independente, tendo sido criado por diversos origamistas em épocas diferentes. Os módulos foram aprendidos ao longo de alguns meses enquanto estudava aspectos dos origamis modulares. Tendo percebido que estes módulos independentes permitiam combinações entre si, procedi a uma série de experimentos

combinatórios com eles. Realizando estas operações de combinação durante cerca de três anos a partir de 2011 desenvolvi uma gramática de composição chegando em algumas estruturas que originaram as peças que denominei SedaToys. Esta fase da pesquisa gerou uma exposição em espaço público no ano de 2013 (Toyart Parade, durante o Festival colaborativo Anhangabaú da FelizCidade (Seda, 2012) e uma instalação na mostra Mixto Quente na Casadalapa no mesmo ano. Deste momento em diante, a pesquisa em origami modular a partir da combinação destes quatro módulos ficou adormecida até 2017 quando retomei a ideia dos SedaToys, unindo a ela minha pesquisa em origami e robótica, também previamente descrita.

O objetivo deste resumo prévio é uma tentativa de mapear as origens do processo criativo que gerou a obra aqui descrita, o ModoriTuk. As possibilidades criativas destas combinações construtivas dos origamis modulares são provavelmente um dos motores do desenvolvimento que culminou nos módulos que compõe o ModoriTuk. Apesar das enormes diferenças de material e de encaixe ambos os sistemas, SedaToys e ModoriTuk trazem algumas semelhanças. Nos SedaToys os módulos de papel se encaixam através de uma inserção de planos (Figura 40) permitindo com isso a movimentação em ângulo de um módulo em relação ao outro.

Figura 40 — Sedatoy, escultura de papel de Daniel Seda

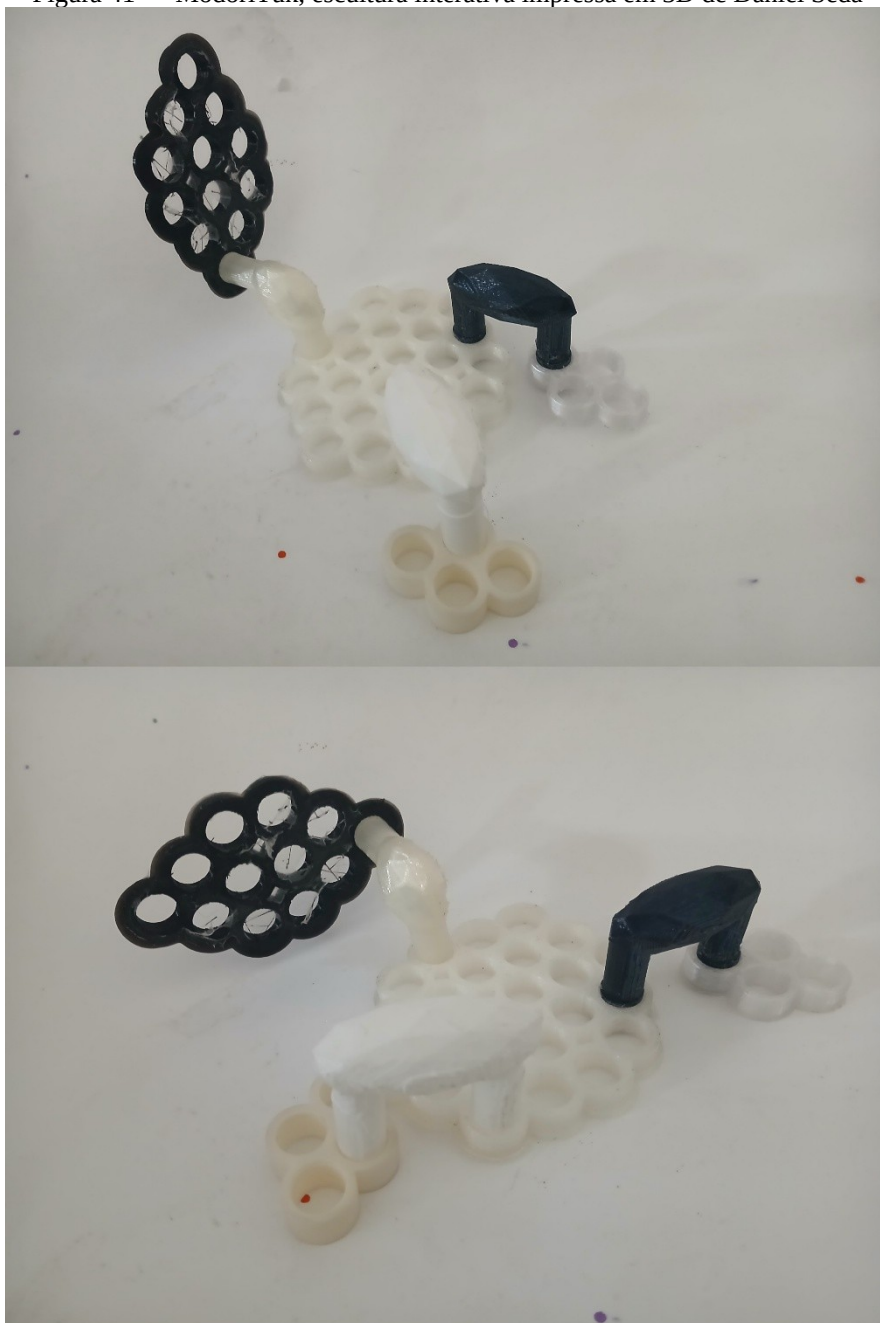


Fonte: Fotografia do autor, 2013.

Também no ModoriTuk os módulos se encaixam permitindo o movimento em ângulo,

produzindo um movimento radial, mas neste sistema o encaixe acontece a partir de um padrão de pinos e furos que mantém o módulo conectado ao mesmo tempo em que permite o movimento (Figura 41).

Figura 41 — ModoriTuk, escultura interativa impressa em 3D de Daniel Seda



Fonte: Composição de fotografias do autor, 2025

Acredito ter deixado bastante evidente que o processo de desenvolvimento do ModoriTuk não aconteceu de maneira linear. Durante os anos que separam os dois sistemas

aconteceram alguns fatos que determinaram a trajetória de criação do ModoriTuk. O primeiro deles foi o meu interesse em fabricação digital, especialmente nas técnicas que envolvem a impressão 3D. Como parte integrante de minhas funções profissionais como Educador de Tecnologias e Artes do SESC Avenida Paulista, tive acesso a pelo menos dois modelos de impressoras 3D e ao longo de dois anos pude me dedicar ao estudo de seu funcionamento. Dentro de minhas atribuições profissionais, propus uma oficina de introdução a estas técnicas em parceria com a artista e bióloga Fabíola Fonseca²⁴. O tema desta atividade foi a biologia dos insetos e para isso desenvolvi um material pedagógico já descrito neste texto e que denominei Mosca Modular. A proposta era oferecer aos alunos um material simples de onde eles poderiam partir para customizar seu próprio inseto a ser impresso em aula. Durante este processo a turma foi apresentada ao software Blender e partindo do modelo de mosca fornecido puderam alterá-lo ou começar outro modelo qualquer a partir das ferramentas disponíveis no software.

A Mosca Modular consistia em um conjunto de peças sendo um corpo feito por 7 tubos colados lateralmente formando duas camadas, uma com 4 tubos e outra com 3 tubos. Além deste corpo o modelo também continha 6 patas ligeiramente diferentes com pinos que podiam ser encaixados no corpo. E para finalizar o modelo ainda continha duas asas e dois olhos, todas as peças possuindo também pinos permitindo o encaixe no corpo. Este modelo foi disponibilizado para a turma e também foi publicado em local adequado para download gratuito, com uma licença Creative Commons (Seda, 2020).

Ao final deste curso, em março de 2020, o mundo foi atingido pela pandemia de SARS-COV-2 e devido ao isolamento as unidades do SESC SP foram temporariamente fechadas ao público e aos funcionários.

Neste momento de isolamento a pesquisa prática nesta linha que vinha seguindo a partir da modelagem e da impressão 3D foi temporária e bruscamente interrompida. Após o choque, continuei uma pesquisa em estruturas modulares usando uma técnica completamente diferente ao retomar uma investigação não estruturada sobre o uso de garrafas plásticas descartadas como um tipo de módulo. Como já mencionei, o objetivo deste capítulo é a descrição detalhada de um processo de criação que esteve longe de ser linear. Através deste texto estabeleço conexões entre processos que aconteceram em épocas diferentes e fazendo uso de materiais e técnicas bastante diferentes. A acumulação de garrafas plásticas visando a futura produção de alguma

²⁴ A oficina Insetos Modulares em 3D estava prevista para acontecer de 13 de fevereiro a 5 de março de 2020 no Espaço de tecnologias e Artes do SESC Avenida Paulista ministrada por Daniel Seda e Fabíola Fonseca. Teve sua última aula cancelada devido ao início da pandemia de SARS-COV-2.

obra indeterminada já estava em curso, em paralelo, há alguns anos, sendo anterior à pesquisa com modelagem e impressão 3D. Neste momento de isolamento e estando temporariamente desnortado em relação a qual caminho seguir em minha produção prática relacionada a este doutorado comecei a produzir alguns modelos de blocos formados por garrafas plásticas conectadas de algumas maneiras diferentes (Figura 42).

Figura 42 — Estudos para módulo com garrafas plásticas



Fonte: Composição de fotografias do autor, 2025

Conectei as garrafas formando longas linhas tubulares. Cada uma delas foi unida lateralmente a outras formando painéis. Estes painéis podiam ser compostos entre si formando estruturas maiores. Outros tipos de blocos menores também foram criados que podiam ser encaixados livremente, apenas apoiados (Figura 42).

Ainda outro tipo de módulo surgiu nesta etapa com cada garrafa unida lateralmente à outra a partir de elásticos que permitiam a rotação de uma em relação a outra. Girando um módulo-garrafa em relação ao outro conectado com elásticos permitia a mudança de sua forma geral e a criação de “desenhos” no espaço (Figura 43).

Figura 43 — Estudos para módulo com garrafas plásticas



Fonte: Composição de fotografias do autor, 2025.

Esses estudos com garrafas seguiram em paralelo, mas, a partir de setembro desse ano horrível, ainda em isolamento, sem perspectiva de vacina e sob um governo federal irresponsável, pude adquirir uma impressora 3D própria. O modelo escolhido foi o Ender 3 Pro, da fabricante chinesa Creality 3D. Com recursos próprios adquiri e montei a impressora e, após alguns erros e montagem e de configuração, pude dar continuidade à pesquisa prática em impressão 3D interrompida em março. Retomei neste momento a lógica das dobras inspirada pelo origami. Seguindo na proposta de experimentar com a modularidade e suas possibilidades de composição de formas, encontrei alguns artistas que me inspiraram. O origamista brasileiro Jo Nakashima²⁵ tem um conhecido canal no YouTube onde posta tutoriais de suas criações. Ele criou uma obra que consiste em cubos conectados formando um sistema que altera a própria configuração geral a partir de alguns movimentos de quem interage. Uni a esta fonte de inspiração o trabalho do já citado artista sueco Erik Åberg²⁶. Pesquisando sobre o processo criativo deste artista descobri que ele também havia partido do origami para desenvolver os módulos de madeira que chamou de GhostKube (Åberg, 2020). A transformação quase mágica produzida por um engenhoso sistema original de encaixes de placas de madeira foi uma grande inspiração dentro desta pesquisa. O trabalho de Åberg foi um marco importante no meu caminho rumo a um sistema original que exemplificasse o conceito de matéria programável, ou seja, um sistema que mudasse de forma com o mínimo de energia conforme a necessidade.

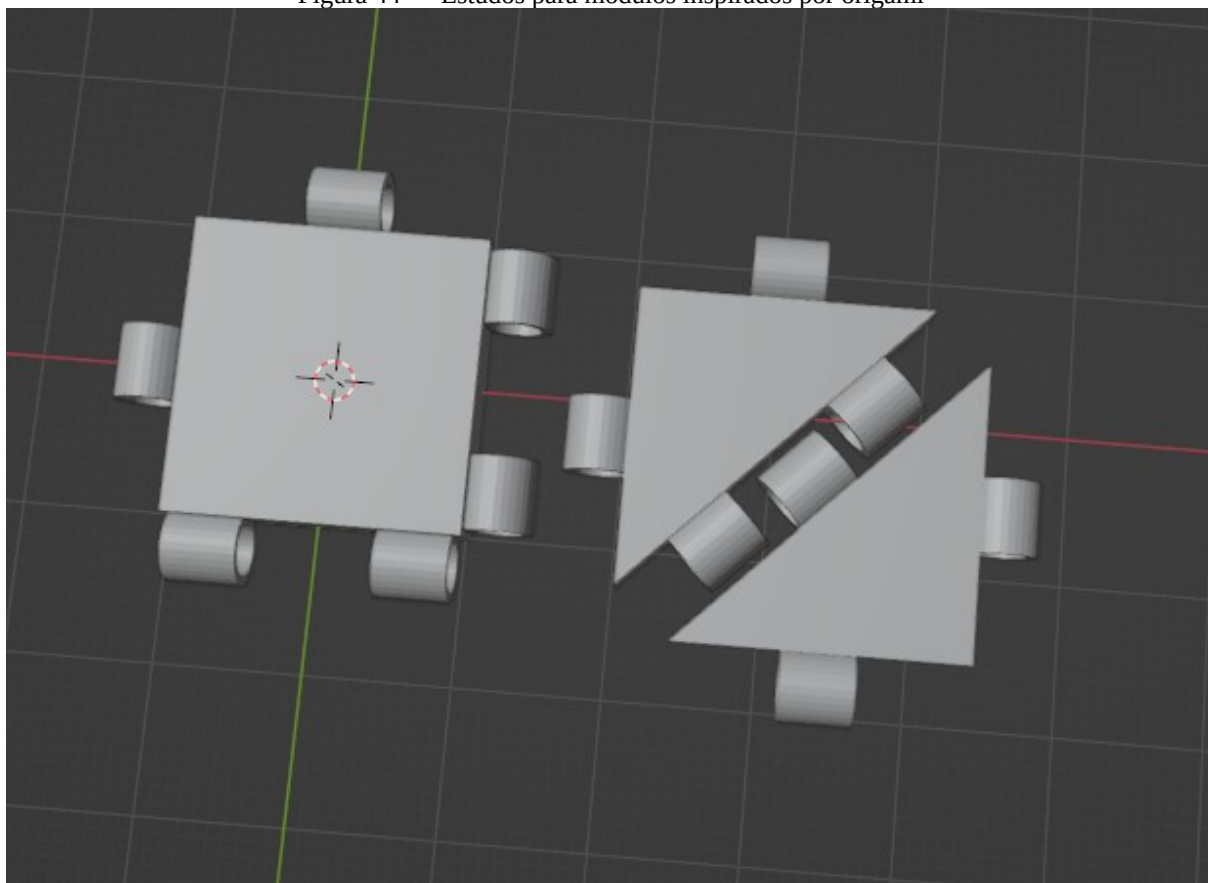
De início imaginei que seria capaz de criar um módulo triangular único que permitiria múltiplas combinações e me pus ao trabalho. Neste momento parti de um módulo anterior. Ainda lá no início dos meus estudos com modelagem e impressão 3D criei alguns tipos de

²⁵ Disponível em <https://www.youtube.com/@jonakashima>. Acesso em: 18 nov. 2025.

²⁶ Site de Erik Åberg Disponível em: <http://erikaberg.com/projects/>. Acesso em: 10 de maio de 2025.

módulos triangulares e um tipo de módulo quadrado (Figura 44). Neste momento, em 2018, o encaixe dos módulos era através de tubos posicionados nas arestas de cada módulo e a conexão se completava com um arame fino atravessando os tubos de ambos os módulos a serem conectados.

Figura 44 — Estudos para módulos inspirados por origami

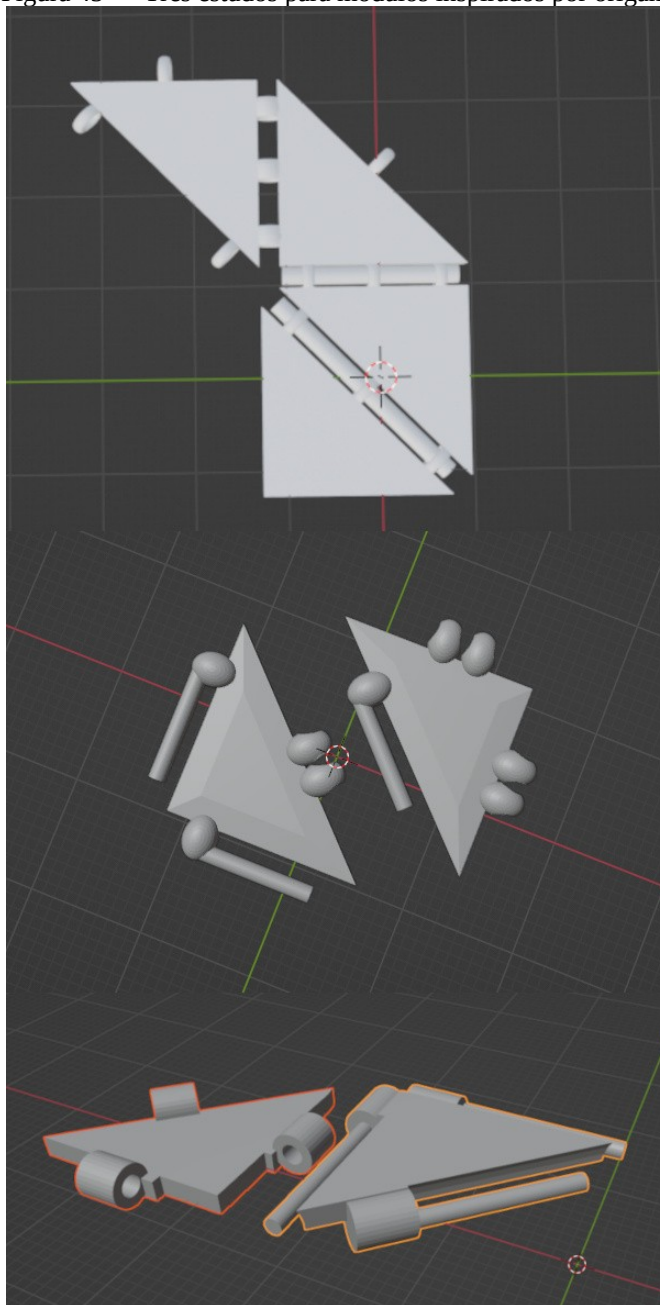


Fonte: Registro feito pelo autor do software Blender, 2025.

Este modelo na época não foi muito bem-sucedido pois o encaixe não ficava firme e acabei interrompendo esta linha de investigação.

Resolvi partir do triângulo já criado e acrescentei ao módulo já pronto um pino saindo de uma das arestas (Figura 45). Imaginei então que tendo um pino e um tubo em cada triângulo seria fácil imprimir vários e conectá-los para produzir origamis rígidos facilmente transformáveis. Na prática apareceram alguns problemas tanto da ordem da modelagem quanto de aspectos técnicos relativos ao fatiamento e à impressão. Da ordem da modelagem, demorei para encontrar um posicionamento dos pinos e tubos que permitisse um encaixe universal dos módulos.

Figura 45 — Três estudos para módulos inspirados por origami



Fonte: Composição do autor com registros de tela do software Blender, 2025.

Também a conexão entre o tubo/pino e o triângulo não mantinha a resistência, muitas vezes soltando. Da ordem do fatiamento e da impressão, o material que eu estava usando, o plástico PLA, não era resistente o suficiente e os tubos e pinos quebravam fácil e soltavam do módulo. Demorei para encontrar e testar uma configuração de preenchimento que gerasse a rigidez necessária.

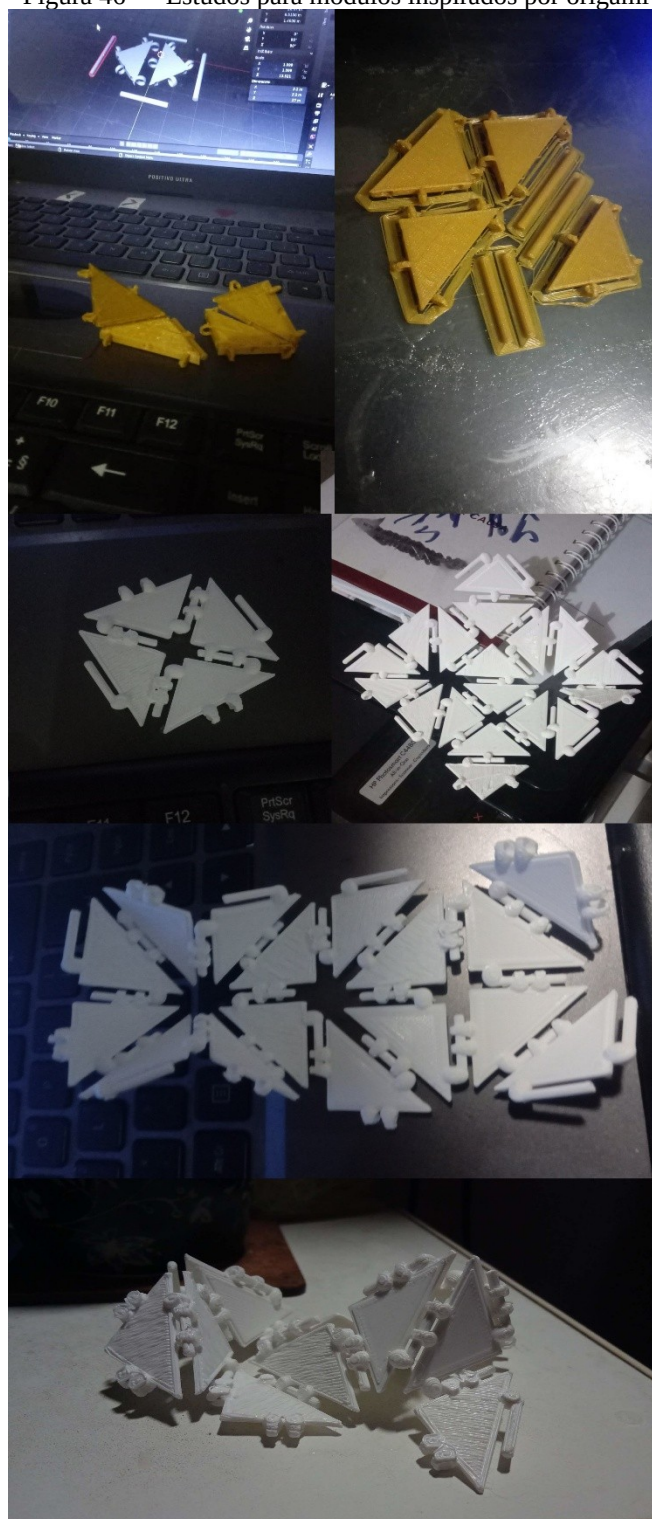
Após muitos testes, cheguei a um modelo que considerei o melhor possível. Neste

módulo, consegui realizar o que havia imaginado, porém ainda assim o resultado ficou aquém do resultado que eu gostaria.

Não satisfeito, comecei novamente do zero e fiz uma outra versão com um design um pouco diferente, mas seguindo a mesma proposta. Fiquei com dois modelos diferentes de triângulos para usar como um módulo universal e montar estruturas que alterassem a própria forma, como uma folha de papel.

Nos dois modelos, os módulos conectados aproximavam-se de um origami rígido, mas não mantinham a estrutura, tanto deslizando e soltando fácil uns dos outros como variando o ângulo de encaixe e criando uma deformação indesejada na estrutura toda (Figura 46).

Figura 46 — Estudos para módulos inspirados por origami

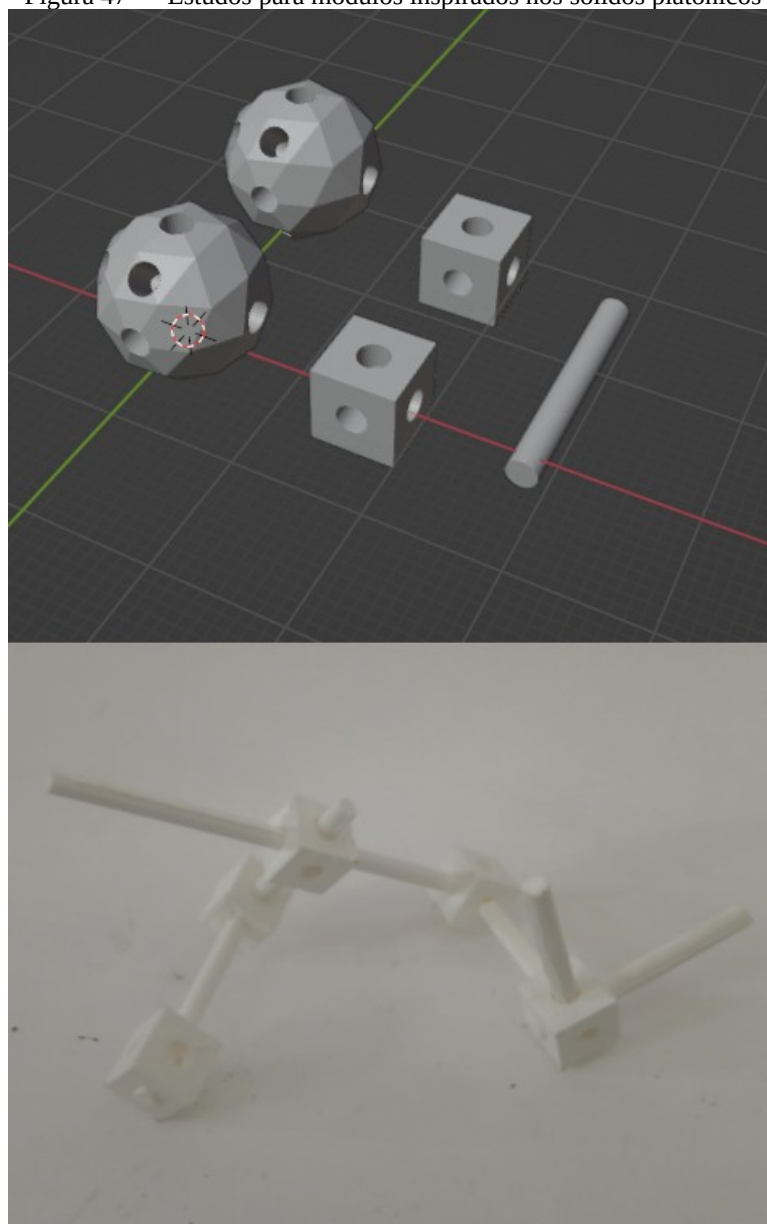


Fonte: Composição do autor com registros do software Blender e fotografias do autor, 2025.

Depois tentei algumas formas simples: um cubo pequeno com furos e um pino simples que encaixasse nos furos mantendo uma certa liberdade de movimento. Modelei essas formas rapidamente no Blender usando as formas básicas presentes no próprio programa e aplicando a

elas operações de combinações, subtrações e outras alterações pontuais de escala e imprimir alguns cubinhos e pininhos para testar a viabilidade do sistema em sua forma física. Após as impressões fiz algumas variações e registrei em fotos. O resultado ficou interessante, mas este caminho criativo me pareceu um tanto sem graça. Imaginei que poderia facilmente seguir com esta linha investigativa ampliando o escopo de variações e incluindo os outros quatro sólidos platônicos: o tetraedro, octaedro, dodecaedro e o icosaedro. Essa linha me pareceu bastante promissora, mas muito óbvia (Figura 47).

Figura 47 — Estudos para módulos inspirados nos sólidos platônicos



Fonte: Composição de imagens do autor, 2025.

Arquivei mais esta linha de investigação, como é comum dentro do meu processo criativo. Eu não sou o tipo de artista que insiste linearmente em um caminho até chegar ao resultado imaginado de início. Ao contrário, sou um artista que passeia sem pressa por diversos caminhos, alternando regularmente entre eles e sem um compromisso de finalizar nada. A menos que haja uma encomenda clara por parte de terceiros ou um prazo inadiável o meu processo passeia. Meu compromisso parece ser mais com a pesquisa e o processo de investigação do que com um resultado rápido. Durante muito tempo me questionei sobre a validade disso, mas atualmente, com quase 30 anos de produção e mais de 50 de idade, me reconheço neste processo e aceito isto como uma característica pessoal.

Então neste momento mudei de assunto e resolvi criar um mini boneco articulado que pudesse ser impresso inteiro de uma vez, inspirado pelo *Playmobil*, um dos meus brinquedos preferidos durante a infância.

Novamente usando o Blender e partindo das formas básicas modeliei o corpo usando o *Playmobil* como referência e fui acrescentando os braços e pernas articulados e uma cabeça que podia balançar de um lado para o outro. Fiz algumas impressões e rapidamente cheguei a um resultado bastante satisfatório (Figura 48).

Figura 48 — Impressão 3D do boneco Tuk



Fonte: Fotografia do autor, 2020.

Com estas modelagens eu estudava o Blender ao mesmo tempo em que desenvolvia a pesquisa. Este programa é extremamente complexo e possui muitos recursos avançados. Usei

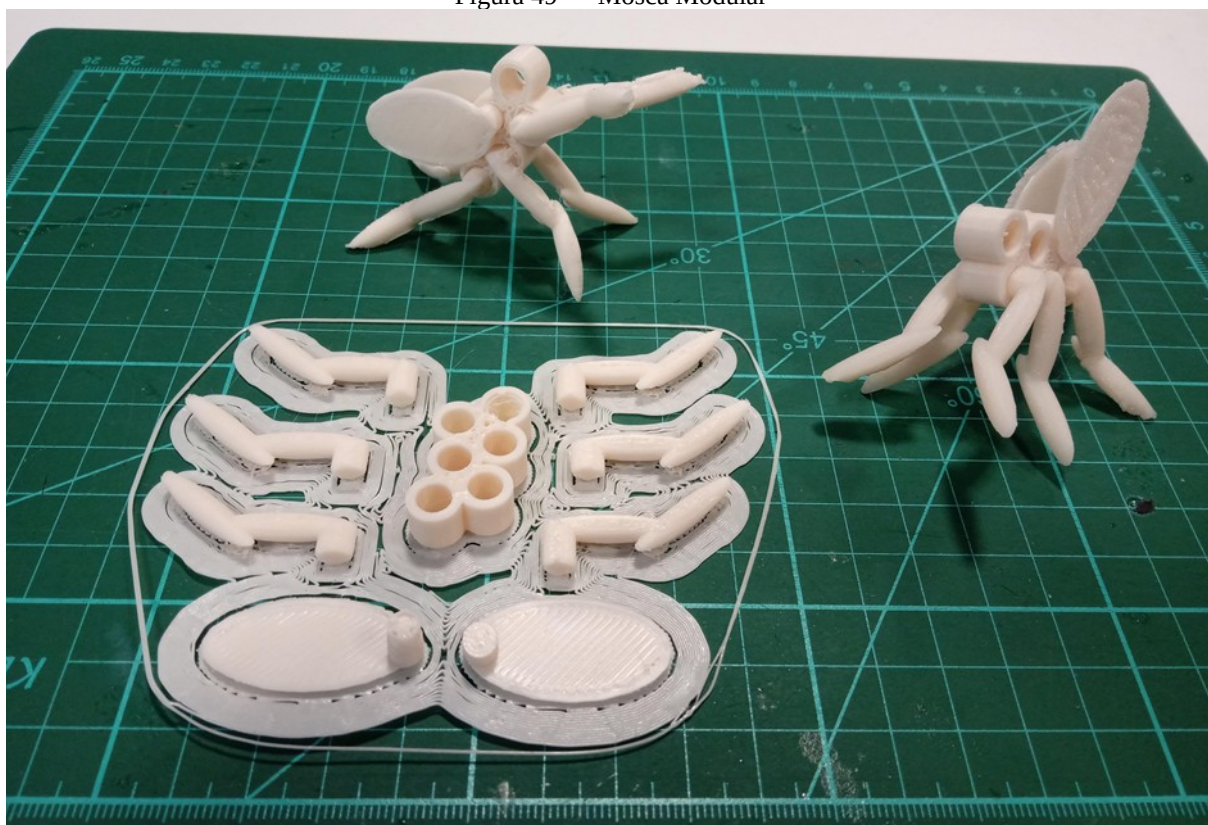
estas modelagens tanto dos triângulos quanto do boneco para aprender a me mexer dentro do programa e fazer tudo o que precisava. Conforme ia precisando, aprendia mais com auxílio de tutoriais em vídeo e em texto, fartamente disponibilizados pela comunidade de usuários na internet.

A este primeiro boneco denominei Tuk, por nenhum motivo especial, apenas me pareceu um nome fácil e divertido. Lembrei que o *Playmobil* original permitia que o cabelo fosse desencaixado da cabeça e trocado. Pesquisando entre meus materiais de referência encontrei um registro de alguns potes de cerâmica egípcios que na verdade eram urnas funerárias para receber as vísceras retiradas das múmias. Cada uma destas urnas tinha como tampa a cabeça de um deus: Anúbis, Osíris, Hórus, Thot. Esta imagem já foi apresentada no Capítulo 3 como Figura 16.

Resolvi fazer uma sequência de cabeças inspiradas nelas para serem encaixadas no boneco Tuk. Voltei ao Blender, separei a cabeça e aí tomei a decisão de fazer o sistema de encaixes como já tinha feito nos insetos modulares. Abri o projeto da Mosca Modular (Figura 49) e copieei as medidas que já haviam funcionado tanto para o pino quanto para o tubo. Modelei a cabeça de um Anúbis novamente realizando operações a partir das formas básicas do programa e criei um tubinho no lugar do pescoço. Ainda demorei algumas impressões e testes para conseguir criar um pescoço que não soltasse do corpo com os encaixes e desencaixes sucessivos da cabeça, mas depois de algumas remodelagens, funcionou. Com a primeira cabeça funcionando, modelei mais uma cabeça de águia (Hórus) e um humano (Osíris), registrado aqui na Figura 50.

Para ter rapidamente o resultado do protótipo em mãos, configurei uma altura de camada com pouca resolução, de 0,3 mm, e o resultado foi absolutamente surpreendente. A textura criada por esta resolução me pareceu fascinante. Fiquei apaixonado pela criação e imprimi várias outras cópias destes primeiros modelos do Tuk.

Figura 49 — Mosca Modular



Fonte: Fotografia do autor, 2020.

Figura 50 — Impressão 3D do boneco Tuk alterado com 3 versões de cabeça



Fonte: Fotografia do autor, 2020.

Então, olhando as mãos, novamente lembrei do *Playmobil*, cujas mãos tinham um formato que permitia o encaixe de objetos. Pensei de início em anexar um tubinho no lugar nas mãos que permitisse o encaixe de outras peças, mas depois me pareceu óbvio que os braços inteiros também poderiam ser trocados. Fiz alguns modelos de braços como já havia funcionado com as pernas da Mosca e imprimi. Com o sucesso dos braços intercambiáveis resolvi criar um segundo corpo que pudesse ter suas pernas também substituídas. O primeiro corpo havia sido projetado de modo a ter as duas pernas móveis, mas embutidas, permitindo que corpo e pernas fossem impressas já unidos. Um pino horizontal na parte inferior do corpo mantinha as pernas unidas ao corpo ao mesmo tempo em que permitia os movimentos das duas pernas independentes, em ângulos (Figura 51).

Figura 51 — Modelagem 3D do boneco Tuk alterado com 2 versões de pernas



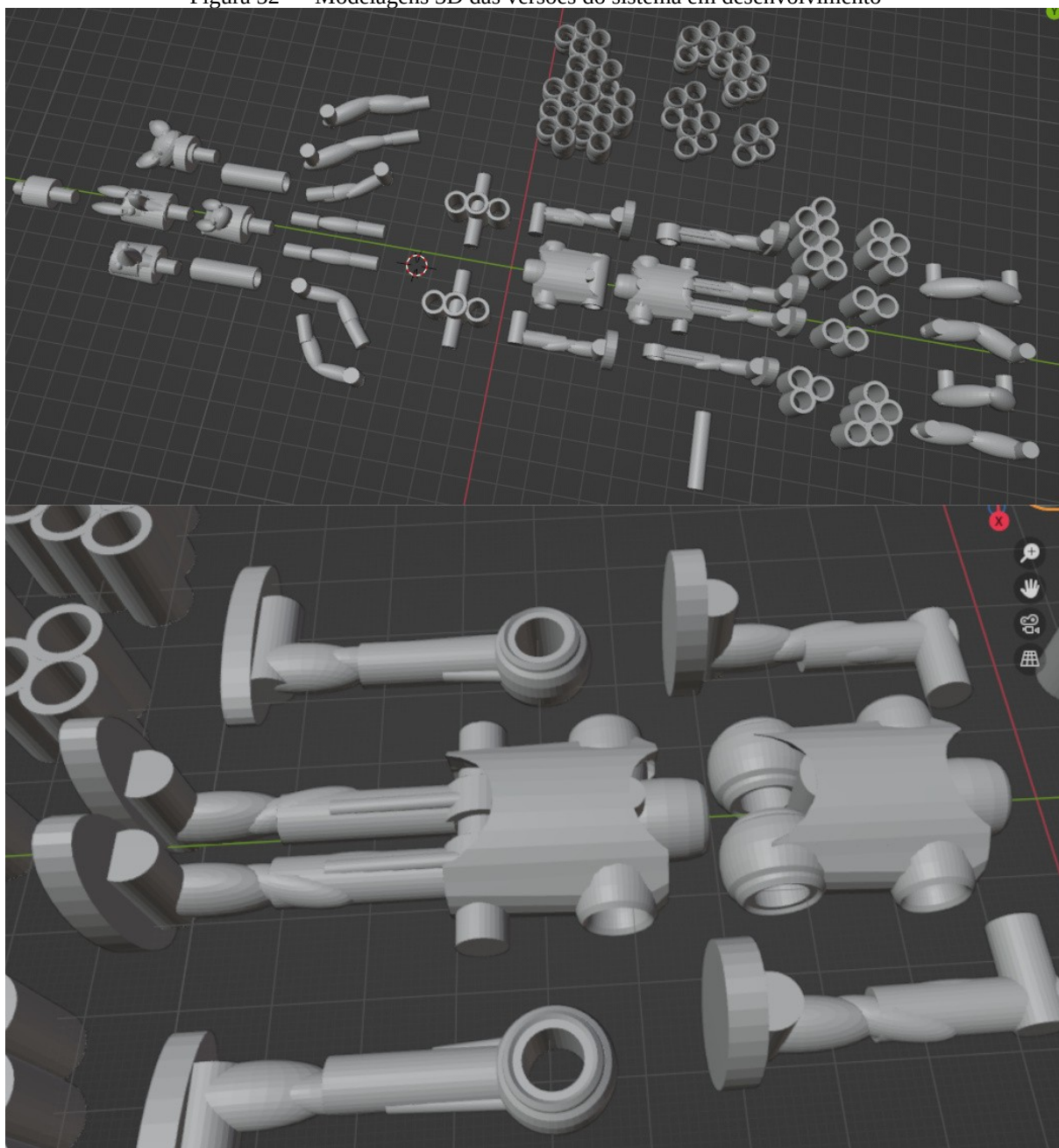
Fonte: Registro do autor, 2025.

Neste segundo corpo, no lugar de um pino atravessado fiz dois tubinhos posicionados

nas laterais, de modo que pudessem receber as pernas, que teriam pinos para encaixe. Para tentar contornar a fragilidade apresentada no pescoço, ao invés de criar os tubinhos com cilindros resolvi usar a forma básica de uma rosquinha. Estiquei verticalmente e a forma ficou parecida com um pneu. Variei o diâmetro interno dela para que o ponto mais estreito tivesse a medida do tubo usado na Mosca, medida que já havia funcionado. Na Mosca Modular, o corpo era formado por 7 tubinhos colados e por isso a fragilidade não acontecia, mas, no pescoço do Tuk, o cilindro furado de modo a virar um tubo não resistiu, quebrando sempre no mesmo local. Tentei contornar isso usando a nova forma de rosquinha e obtive um sucesso parcial. A resistência da peça ao rompimento de fato aumentou, mas a forma curva do interior do encaixes não mantinha o pino firme e com qualquer movimento ele soltava. Insisti bastante nesse modelo, pois ele me parecia mais bem resolvido esteticamente do que um simples tubo, e fiz diversos módulos com ele. Atribuí o problema de desencaixe às configurações de impressão e insisti mais um tanto neste formato.

Nesse momento do processo criativo, o boneco já deixava de ser o centro do projeto embora eu ainda não houvesse percebido isso. Ao redor do boneco Tuk já havia uma família de braços, pernas e módulos irregulares formados por tubinhos colados uns nos outros formando planos com muitas opções de encaixes. Fiz várias impressões e experimentações com composições tridimensionais livres combinando esses módulos até perceber que o tubo derivado da rosquinha modificada era realmente o responsável pelo encaixe precário (Figura 52).

Figura 52 — Modelagens 3D das versões do sistema em desenvolvimento



Fonte: Composição do autor, 2025.

Então abandonei esse formato e voltei para o tubo original, um cilindro furado nas dimensões daquele criado para a Mosca Modular. Desde o início do desenvolvimento do sistema, segui a regra de salvar o projeto com outro nome a cada alteração substancial com redesenhos significativos. Isso segue acontecendo, e a versão atual é a 250 (Figura 53).

Figura 53 — Registro da versão 250 do Sistema ModoriTuk



Fonte: Registro do autor, 2025.

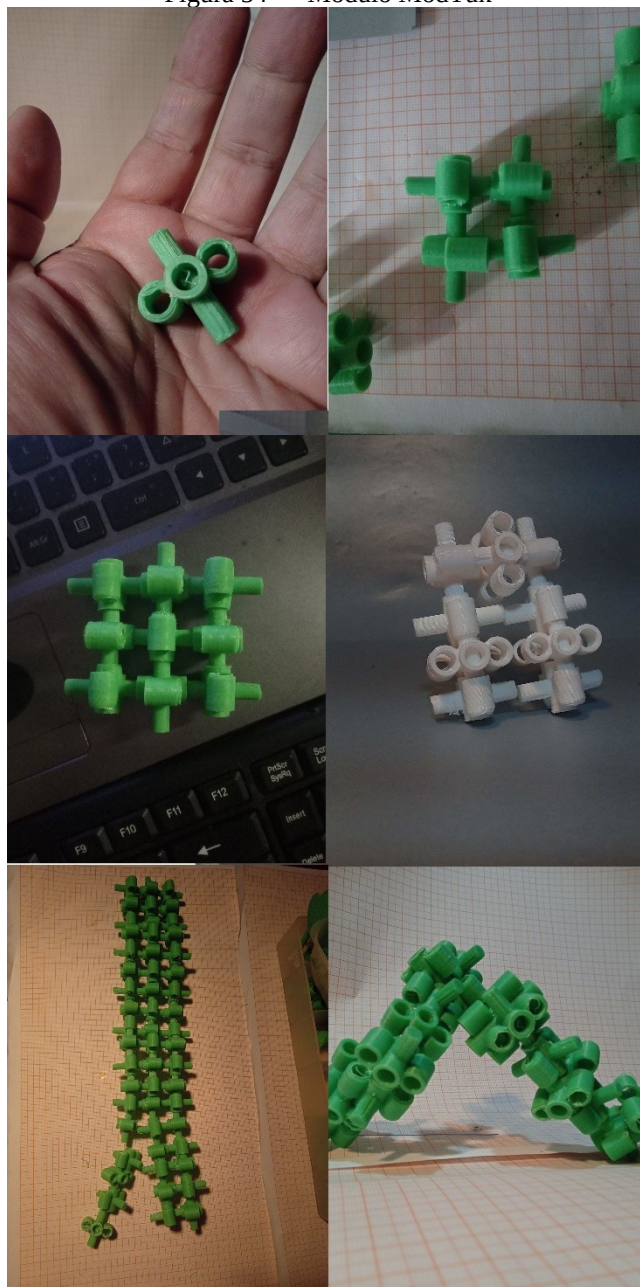
Esse desenvolvimento prosseguiu desde meados de setembro até o final do ano pandêmico em um país ainda sem perspectiva de vacina e na minha condição privilegiada de ainda seguir em isolamento. No mês de dezembro desse ano terrível, eu estava dedicado a encontrar um modelo de módulo que funcionasse como uma partícula universal: um módulo único que pudesse ser multiplicado e combinado. Uma espécie de *lego*, um módulo com um design original e que permitisse construir muitas formas diferentes. Mas, seguindo o conceito de matéria programável, eu buscava um módulo para construir inúmeras formas sendo estas também passíveis de movimento. E foi exatamente na virada do ano de 2020 para 2021 que eu consegui materializar este módulo. O módulo era composto de três tubos e um pino. Como cada um dos tubos colados lateralmente permitia o encaixe de ambos os lados e o pino atravessava ortogonalmente o tubo do meio, o módulo tinha 8 posições diferentes de encaixes.

Em cada uma delas o módulo permitia a movimentação do outro módulo encaixado. Por ser um módulo criado para ser encaixado na família de módulos que crescia em torno do boneco Tuk, chamei este de ModTuk.

Imprimi inúmeras instâncias deste módulo para testar seu potencial de construção a partir do modelo mental imaginado por mim onde um único módulo teria a capacidade de

construir estruturas complexas e dinâmicas, ou seja, capazes de realizar alguma transformação de sua forma geral. O módulo de fato foi bem-sucedido e me permitiu construir formas bastante diferentes entre si (Figura 54).

Figura 54 — Módulo ModTuk



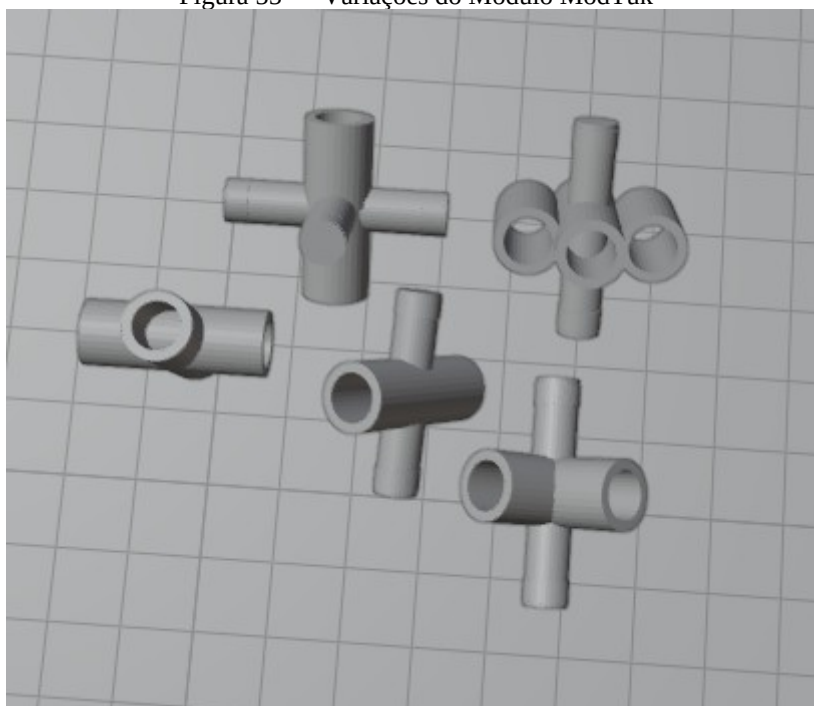
Fonte: Composição de fotografias do autor, 2025.

Mas ainda havia problemas de design para serem resolvidos: o encaixe ainda não era firme o suficiente, às vezes funcionava e outras vezes soltava mais fácil. Ainda me debati durante meses, procurando entender exatamente onde estava o problema. Não queria alterar

fundamentalmente as dimensões, e o problema parecia não fazer sentido. Atribuí essa instabilidade a pequenas diferenças na impressão, fruto ou da qualidade do filamento ou da própria impressora. Algumas peças encaixavam perfeitamente enquanto outras ficavam frouxas e isso acontecia a partir do mesmo arquivo, com o mesmo filamento sendo usado na mesma impressora. Isso só foi ser resolvido realmente muito tempo depois, quando alonguei tanto o tamanho dos tubos quanto dos pinos. Mudar o material de PLA e ABS para PETG e posteriormente TPU também ajudou na estabilidade do encaixe.

Apesar desse pequeno problema, os módulos encaixavam bem o suficiente para criar as formas minimamente estáveis em média, e trabalhando nas variações possíveis para os módulos cheguei a um sistema composto de cerca de 30 peças diferentes. Esses módulos eram corpos, braços, pernas, cabeças e também muitos módulos abstratos formando planos a partir de tubos e outras variações. A partir do ModTuk inicial, criei outras variações, combinando pinos e tubos em quantidades e posições diferentes. De início me contentei com cinco destas variações.

Figura 55 — Variações do Módulo ModTuk



Fonte: Registro do autor, 2025.

A semelhança entre as composições tridimensionais que fiz e estruturas microbiológicas como proteínas foi logo notada por mim e imaginei que conseguiria chegar em cinco peças que pudessem funcionar como as bases nitrogenadas que compõem o DNA e RNA dos seres vivos.

Na prática, os resultados mais próximos de sistemas biológicos foram obtidos a partir de

outro conjunto de módulos que comecei a desenvolver alguns meses depois. Neste momento, já experimentava com o filamento PETG que se mostrou mais adequado do que os outros experimentados até então. Finalmente usando este filamento, resolvi o problema da estabilidade do encaixe. Sendo o PETG mais resistente, ao mesmo tempo que suporta uma ligeira deformação, pude alterar de modo mínimo as dimensões do pino, tornando-o ligeiramente elíptico em seu diâmetro por apenas 0,01 mm de diferença. Essa variação feita com esse filamento, mas impossível nos outros utilizados até então, tornou o encaixe finalmente perfeito. Caso o modelo específico para o PETG (e que depois também se mostrou adequado ao TPU) seja impresso usando PLA ou ABS a peça irá encaixar sem permitir sua rotação. E depois poderá quebrar ao ser desencaixada.

Usando o PETG e desenvolvendo esta coleção de peças-pinos e peças-tubos, parti para um momento da pesquisa cujo foco deixou de ser o boneco Tuk e passou a ser a programação da matéria de modo analógico. Tenho ainda no horizonte futuro desta pesquisa, em uma etapa futura após a publicação desta tese, a fusão destes módulos com componentes eletrônicos, mas por ora a pesquisa já considera este o melhor resultado para visualização do conceito de programação da matéria.

As estruturas transformáveis criadas por esta família de módulos possuíam inequívoca semelhança com sistemas biológicos básicos e a facilidade com se podia alterar totalmente a forma com alguns poucos movimentos, muitas vezes sem desencaixar nenhuma peça de seu lugar me trouxe à mente o conceito de rizoma.

Foi aproximadamente neste momento que resolvi reler o livro *Mil Platôs*, da dupla Deleuze e Guattari (1995). Já havia tentado essa leitura em outro momento da vida e aquilo tudo me pareceu incompreensível, mas desta vez ao reler o primeiro volume eles pareciam descrever exatamente o sistema que eu tinha acabado de inventar.

Também percebi que, apesar do sentido na leitura precoce me ter escapado quase totalmente, desde aquele momento eu já havia absorvido muitas das ideias descritas, de tal modo que nesta releitura muitos e muitos anos depois reconheci a origem de vários conceitos que considerava meus.

Enquanto seguia criando módulos e testando formas a leitura, e não apenas destes autores, seguia em paralelo. Outro texto que finalmente resolvi ler foi o tão influente quanto esquecido *O Acaso e a Necessidade*. O livro do bioquímico e vencedor do Prêmio Nobel na área Jacques Monod (1971) é uma admirável construção teórica fartamente fundamentada em seu

conhecimento prático. Neste livro o autor descreve com detalhes como a forma das proteínas está essencialmente relacionada às funções exercidas por elas no metabolismo. O autor demonstra passo a passo como o metabolismo é capaz de criar estruturas físicas recursivas que funcionam como um mecanismo, uma máquina de moléculas que se autorregula, liga e desliga processo e o faz de modo preciso há milhões de anos a partir de muitas combinações de módulos que produzem formas específicas. A leitura deste livro me trouxe uma gigantesca inspiração e reforçou a ideia de adaptar futuramente o sistema ModoriTuk para que também possa funcionar como um material próprio para o ensino de aspectos da microbiologia.

A próxima etapa do processo de criação deste sistema foi a inclusão de um módulo em formato de um chapéu de cogumelo. Pensando em retrospecto, acho provável que o conjunto de módulos para formar um cogumelo tenha surgido de forma espontânea dentro do processo da transformação do sistema a partir do módulo que chamei de ModTuk. Toda a família de dezenas de peças que surgiram ao redor deste módulo e à margem do boneco Tuk original colocou em movimento a nova etapa de um processo criativo que ainda não parou. O conjunto de peças conectadas alternando módulos com diversos tubos unidos e módulos conectores com dois pinos formando uma corrente modelável e transformável possivelmente contribuiu para a sugestão de um micélio. Também a associação que eu estabeleci entre o sistema de módulos nascido do ModTuk e o conceito de rizoma conforme descrito por Deleuze e Guattari (1995, 2010), no *Mil Platôs* e também no *O Que é Filosofia* deve ter trazido ao meu inconsciente a ideia de cogumelos uma vez que a estrutura dos micélios fúngicos é frequentemente descrita como rizomática.

O fato é que o cogumelo emergiu dentro do processo no fim do ano de 2021 e a partir daí tornou-se um novo motor de desenvolvimento deste projeto. A partir do conceito de cogumelo e dentro do processo de reabertura gradual da unidade do SESC Avenida Paulista, onde trabalho, no pós-pandemia que se anunciava, convidei novamente a artista e bióloga Fabíola Fonseca para um novo curso misturando biologia e impressão 3D²⁷. O curso agora girava em torno da ecologia dos fungos, sua importância para o meio ambiente, sua diversidade e sua morfologia. O material pedagógico oferecido à turma neste momento foi selecionado dentro do próprio sistema de peças já desenvolvido até este momento. A proposta de exercício feita aos alunos foi parecida com a proposta da aula dos insetos modulares no ano anterior: usar o padrão de encaixes do sistema para criar novos modelos de cogumelos. Sendo os módulos do sistema

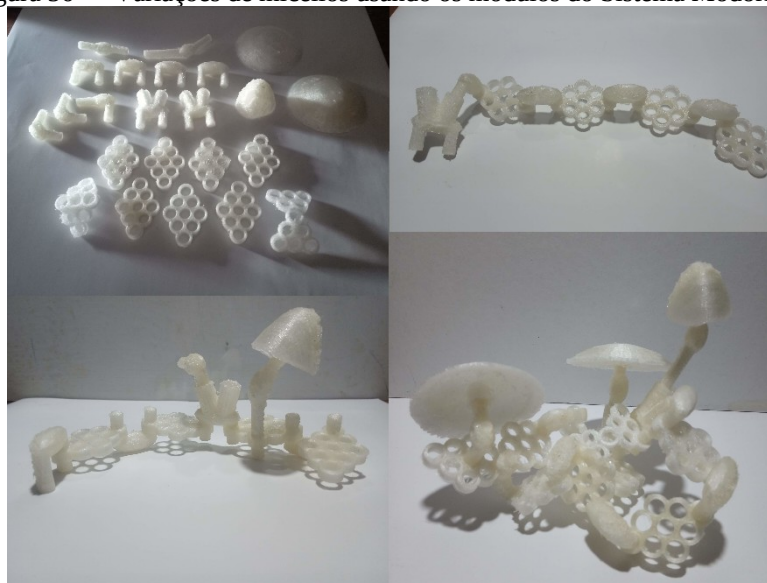
²⁷ O curso Introdução à Impressão 3D: Criação de Fungos Modulares aconteceu de 11 a 27 de janeiro de 2022, no Espaço de Tecnologias e Artes do SESC Avenida Paulista, ministrado por Daniel Seda e Fabíola Fonseca.

feitos a partir de formas básicas presentes no software Blender, o desenvolvimento de novas peças compatíveis se torna fácil. Além disso apenas copiando e colando as duas partes conectáveis, o pino e o tubo, fica fácil trazer qualquer outra peça já pronta para dentro do sistema.

Virtualmente é um sistema que permite estabelecer relações ou, como diriam Deleuze e Guattari, permite fazer rizoma com qualquer outro modelo 3D já pronto apenas adicionando a ele algum dos conectores, seja um tubo ou um pino nas medidas padronizadas de encaixe do sistema.

Passei alguns meses nesse caminho experimentando algumas variações de modelos de chapéus, desenvolvendo alguns conectores com pinos e tubos no mesmo módulo para integrar e expandir os micélios de um modo orgânico e criando kits de peças para montar grupos de micélios e chapéus.

Figura 56 — Variações de micélios usando os módulos do Sistema ModoriTuk



Fonte: Composição de registros do autor, 2025.

O sistema parecia enfim ter encontrado o seu potencial, pois o micélio dos fungos é um corpo que se adapta, se transforma e se expande conforme os recursos disponíveis no ambiente e conforme precisa crescer para acessar as fontes de nutrientes ou distribuir pela rede os recursos disponíveis. O micélio fúngico forma um sistema que muda de forma conforme as suas necessidades, realizando na matéria viva macro e microscópica o potencial da matéria programável. Tendo encontrado um conjunto de peças que realizavam o potencial de uma estrutura transformável, passei a experimentar com as mudanças de formas. Ignorante em

relação à biologia, me dediquei em paralelo a uma pesquisa certamente superficial do ponto de vista da especialidade na área, mas suficiente do ponto de vista de informar o processo criativo a fim de alimentar o inconsciente e o consciente do artista. Conectando módulos-pino e módulos-tubos, criei estruturas lineares que poderiam ser inspiradas pelas estruturas primárias descritas na biologia: o encadeamento linear dos aminoácidos para criação de proteínas, chamado na área de estrutura primária. No sistema aqui desenvolvido, estas estruturas nasceram de dentro do próprio processo criativo, porém, quando me dediquei ao estudo destes conteúdos específicos sobre biologia, percebi que a descrição de um servia para o outro. Da estrutura primária, ou seja, o encadeamento linear dos aminoácidos, surge a estrutura secundária, a dobra desta primeira linha sobre si mesma de um modo muito específico.

No sistema desenvolvido por mim criei algumas sequências de módulos que permitiam a formação de uma estrutura linear e também possibilitaram a sua dobra sem que houvesse a desconexão das peças. Quando conheci os conceitos de estruturas primárias e secundárias, achei curiosa a relação casual e isso vem me inspirando desde então dentro deste processo. Este é o estado do desenvolvimento do sistema ModoriTuk até o momento. O sistema encontra-se publicado em três repositórios diferentes, disponível para download gratuito através de uma licença Creative Commons. Os arquivos para impressão 3D estão identificados entre aqueles apropriados para impressão em PETG, TPU e para impressão em PLA. Os módulos-pino entre as duas versões são ligeiramente diferentes, como já mencionado neste capítulo.

Após o sistema estar pronto e publicado, eu o adaptei para a criação de uma máquina recicladora de garrafas PET. Esta etapa é apresentada nas Considerações Finais deste texto.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao finalizar a dissertação de mestrado, terminei com muito mais perguntas do que havia ingressado. E com a impressão de que nenhuma pesquisa realmente termina. Uma pesquisa levada de maneira consequente leva a outros lugares e eu fui parar em tantos lugares diferentes; depois dos dois anos de pesquisa que vi minha pesquisa se abrir como um fractal: quanto mais eu procurava, mais e mais aspectos interessantes foram surgindo, ainda que eles se distanciaram uns dos outros.

Este processo de criação começou com a descoberta do origami modular em 2012 e chegou ao ModoriTuk depois de 10 anos. A pesquisa em Modularidade, multiplicidade e na criação permanente de formas vem sendo o motor desta pesquisa nestes dez anos. É uma pesquisa sobre o processo de criação, que tem por resultado uma obra com propriedades metamórficas funcionando também como um rascunho de algum sistema mais avançado.

Para o processo de realização desta obra a que cheguei, foi necessário entrar em contato com muitas áreas do conhecimento que eu não havia previsto, como a biologia, e também entender minimamente conceitos de física quântica, como o Modelo Padrão e sua multiplicidade de subpartículas que compõem a matéria e a energia das quais somos feitos. Também entendi conceitos básicos relativos às teorias de Einstein, como a deformação do espaço-tempo causada pela matéria, a velocidade da luz como limite da transmissão de informação no universo. Também me dediquei a textos de antropologia, filosofia, psicologia, ciência da computação entre outros inúmeros assuntos que não domino e que não estão diretamente relacionados com a pesquisa mas que me auxiliaram nas abordagens multidisciplinares que optei por tomar durante a criação desta obra. Tudo isto alimentou a minha imaginação, meu pensamento e os meus processos criativos. Além da obra, os meus resultados incluem esta tese. Espero haver alcançado através desta tese o objetivo de compartilhar os caminhos por onde este processo criativo aconteceu. O principal resultado, a criação do ModoriTuk, já se encontra publicado desde 2021 e pode ser acessado no site www.tuk.tec.br (Seda, [2025a]). Outros resultados incluem a participação em diversos eventos acadêmicos da área, com âmbito nacional e internacional. As inúmeras oportunidades de divulgação da pesquisa durante a minha atividade pedagógica no Espaço de Tecnologias e Artes do SESC Avenida Paulista também podem ser incluídos como resultados da pesquisa, dentro do espírito da divulgação científica muitas vezes evocado neste texto. Aqui está incluído um

subproduto importante do ModoriTuk. Durante minha atuação pedagógica no SESC, acabei por criar uma versão de uma máquina de reciclagem de garrafas PET o que já me abre possibilidades de pesquisa para o futuro.

Nesta conclusão repasso resumidamente os momentos que levaram à criação do ModoriTuk. De maneira muito resumida, esta pesquisa começa com a descoberta de um conceito, programação da matéria, a partir dos meus estudos em origami. Para chegar em uma definição deste conceito que me fosse útil, analisei a bibliografia que pude encontrar a respeito. A partir dessa análise de fontes variadas, inventei uma definição que me guiasse no processo criativo que é parte integrante dessa pesquisa. A definição que aqui apresento é a melhor que encontrei. Programação da matéria é uma maneira de organizar as partes de um sistema de maneira que elas mudem de forma para alterar uma ou mais de suas funções. Matéria Programável, por sua vez, é uma instância ou aplicação desta capacidade que a matéria possui de ser programada para mudar de forma.

Usando este conceito como inspiração para uma criação artística de uma instância de matéria programável, acabei por fazer uso de um outro conceito, o de modelo mental. Novamente me lancei à busca de uma bibliografia específica e descobri que a ideia de modelo mental começa no ensino em ciências exatas e chega até os experimentos imaginários da física teórica. Encontrei, ou melhor criei, uma definição bastante apropriada e que me ajudou a esclarecer certos aspectos da criação da obra que aqui descrevo. Portanto, modelo mental é um sistema imaginário composto de partes que podem alterar suas posições em relação às outras para permitir que alguma ação ocorra no sistema. Creio ser bastante evidente a semelhança entre as duas definições apresentadas destes dois conceitos aqui descritos. Concluo aqui, para registrar e evidenciar esta relação, que o modelo mental é uma etapa necessária para a criação de uma matéria programável. Antes de funcionar no mundo físico, a matéria programável precisa ser imaginada em seus detalhes em um modelo que inclui também as leis da física que farão possível o seu funcionamento no mundo real.

Este foi o caminho seguido por este processo de pesquisa na tentativa bem-sucedida de criar um sistema de módulos que se articulam e fazem o sistema mudar de forma e função. Neste caso do ModoriTuk, uma obra de arte que assume a forma de um brinquedo, a função é lúdica e de fruição estética.

Preciso também deixar registrado que o que eu estou chamando de matéria programável pode também eventualmente ser chamado de metamaterial: um material que muda de forma

para alterar sua função. Entrei em contato com este conceito após a pesquisa estar bastante avançada e, portanto, este conceito não fez parte do escopo desta pesquisa.

5.1 ReciclETA, um subproduto do ModoriTuk

Esta pesquisa termina aqui, mas outras já se encontram em desenvolvimento. Como um subproduto da criação do ModoriTuk, esta pesquisa ainda gerou uma versão de uma máquina de reciclagem de garrafas PET cuja estrutura são os módulos impressos em outra escala. O sistema ModoriTuk foi adaptado por mim para servir de estrutura modular para uma máquina que pudesse ser facilmente desmontada e remontada com fins pedagógicos. Durante um Ateliê Aberto de Reciclagem coordenado por mim, foram desenvolvidas duas versões de uma máquina desenvolvida por Joshua Taylor e publicada por ele em código aberto. A máquina original, a Recreator3D, partia de uma impressora Ender3 para transformá-la em uma recicladora. Durante o Ateliê Aberto eu, como Educador de Tecnologias e Artes do Sesc Avenida Paulista, convidei o pesquisador Chico Simões que trouxe para a atividade a primeira versão da Recreator3D, por nós chamada de Gambioca. Esta versão foi feita desmontando uma impressora modelo Graber e adaptando os arquivos *stl* originais disponibilizados por Taylor. Esta versão funcionou durante os oito encontros da duração do Ateliê Aberto como uma ferramenta pedagógica evidenciando o processo de reciclagem de uma garrafa PET até um filamento para uso em uma impressora 3D. Nestes oito encontros outras duas máquinas foram desenvolvidas e montadas sendo cada uma a variação do modelo anterior. A segunda máquina foi feita por mim a partir de componentes eletrônicos novos, ao invés de desmontar uma impressora. Nesta versão, as peças foram adaptadas para duas barras de madeira que serviram de estrutura, em vez das barras de metal que serviram de estrutura na Gambioca e dos perfis de alumínio da Ender 3 na Recreator3D original. Esta versão foi chamada de GambiETA, incorporando uma referência ao Espaço de Tecnologias e Artes onde o Ateliê Aberto aconteceu.

A versão seguinte, finalmente, foi uma derivação do sistema ModoriTuk e por isto este processo encontra-se descrito aqui. Da GambiETA para a ReciclETA (Seda, 2024), percebi a necessidade de conseguir acessar facilmente qualquer parte da máquina para fins didáticos. A ReciclETA é totalmente modular e facilmente desmontável. Nas versões anteriores, incluindo a original as peças ficam linearmente encaixadas nas barras horizontais e ficam inacessíveis a menos que se desmonte a máquina toda. Outra vantagem da ReciclETA é que a ventoinha

possui movimentação em 360 graus nos três eixos, x, y e z. Nesta máquina, a ventoinha é uma peça importante para resfriar tanto o filamento reciclado quando o hot-end. No entanto, por enquanto, a ReciclETA ainda usa mais filamento para ser impressa do que qualquer dos outros modelos. Mais informações sobre este processo está disponíveis em uma seção do meu site (Seda, [2025b]). Um artigo específico sobre este desenvolvimento escrito em parceria com Chico Simões foi apresentado no CIIACT-SAD em 26 de maio de 2025.

Figura 57 — Máquina de reciclagem de garrafas PET, a ReciclETA



Fonte: Registro do autor, 2025.

Alguns desdobramentos já vêm sendo desenvolvidos dentro do campo da modularidade e das estruturas capazes de alterar a sua própria forma e configuração geral. O futuro desta pesquisa envolve pelo menos duas possibilidades: uma delas seria retomar o fio perdido da conexão entre o mecânico e o autômato, inserindo a eletrônica nos módulos já desenvolvidos. Esta possibilidade dependeria de uma verba e de uma equipe de desenvolvimento que não disponho e por isto mesmo a opção nesta pesquisa foi desenvolver um sistema analógico e não digital. A outra possibilidade de desenvolvimento é a adaptação desta obra para que ela se torne um material pedagógico, de uso em escolas. Poderia ser uma adaptação no sentido de aproximar os módulos das formas das bases nitrogenadas, dos aminoácidos para uso em aulas de biologia. Ou ainda poderia ser uma adaptação no sentido de aproximar os módulos de elementos

químicos para o ensino de química. No entanto, neste momento apenas considero um sucesso a pesquisa já realizada e espero ter conseguido demonstrar neste texto os caminhos tortuosos que levaram da descoberta de dois conceitos, matéria programável e modelo mental, à criação de um sistema analógico de criação de formas articuladas impresso em 3D, o ModoriTuk.

REFERÊNCIAS

- ÅBERG, Erik. Ghostkube. **Kickstarter**, 23 nov. 2020. Disponível em: <https://www.kickstarter.com/projects/ghostkube/ghostkube/>. Acesso em: 5 maio 2025.
- ADAMS, Douglas. **O guia definitivo do mochileiro das galáxias**: a trilogia de cinco em um único volume. Tradução de Carlos Irineu da Costa, Marcia Heloisa Amarante Gonçalves, Paulo Henriques Britto. São Paulo: Arqueiro, 2016.
- ALBERTS, Bruce; JOHNSON, Alexander; LEWIS, Julian; MORGAN, David; RAFF, Martin; ROBERTS, Keith; WALTER, Peter. **Molecular Biology of the Cell**. New York: Garland Science, 2015.
- ALEJANDRIA, Herón de. Neumática. **Internet Archive**, 2002. Disponível em: <https://archive.org/details/neumatica-heron-de-alejandria/mode/2up>. Acesso em: 11 nov. 2025.
- ALLEN, Davis; JOHL, Alyssa; LINSLEY, Chelsea; SPOELMAN, Naomi. **The Fraud of Plastic Recycling**: How Big Oil and the plastics industry deceived the public for decades and caused the plastic waste crisis. Washington, DC: Center for Climate Integrity, 2024. Disponível em: <https://climateintegrity.org/uploads/media/Fraud-of-Plastic-Recycling-2024.pdf>. Acesso em: 22 abr. 2025.
- ANAF, Marcia; HARRIS, Ana Lúcia N. C. Transformable design: an approach between mathematics and arts. In: GEOMETRIAS'14; ENCONTRO DA APROGED, 13., 2014, Lisboa. **Proceedings** [...]. Porto: Norcopia, 2014. p. 71–74. Disponível em: <https://www.aproged.pt/G1417.pdf>. Acesso em: 11 nov. 2025.
- ASH, Arvin. The Entire Quantum Universe is Inside the Atom. **Arvin Ash complex questions explained simply**, 25 jan. 2025. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=x3idMbwNe6w>. Acesso em: 9 maio 2025.
- BANZI, Massimo. **Getting Started with Arduino**. São Francisco: Make Community, 2009.
- BARBROOK, Richard. **Futuros Imaginários, das máquinas pensantes à aldeia global**. São Paulo: Peirópolis, 2009.
- BARBROOK, Richard. The Hi-Tech Gift Economy. **First Monday**, v. 3, n. 12, 1998. DOI: <https://doi.org/10.5210/fm.v3i12.631>. Disponível em: <https://firstmonday.org/ojs/index.php/fm/article/view/631>. Acesso em: 21 abr. 2025.
- BARRAGÁN, Hernando. **Wiring**: Prototyping Physical Interaction Design. Ivrea: Interaction Design Institute, 2004.
- BASES nitrogenadas. **Wikimedia Commons**. São Francisco: Fundação Wikimedia, 2023. Disponível em: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Bases_nitrogenadas.png Acesso em: 15 maio 2025.

BENJAMIN, Walter. **A obra de arte na era de sua reprodutibilidade técnica**. Porto Alegre: Zouk, 2014.

BORTOLOTTI, Lisa. **Introdução à Filosofia da Ciência**. Lisboa: Gradiva, 2008.

BRUNET, Karla S. Software livre e ética hacker como propulsores de projetos artísticos e culturais na Internet. **Revista Digital do LAV**, v. 2, n. 2, p. 099–111, 2010. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/revislav/article/view/2187>. Acesso em: 22 abr. 2025.

BUSH, Vannevar. As We May Think. **The Atlantic**, July Issue, 1945. Disponível em: <https://www.theatlantic.com/magazine/archive/1945/07/as-we-may-think/303881/> Acesso em: 10 out. 2025.

CALCULATOR. **Desmos**, 2025. Disponível em: <https://www.desmos.com/calculator>. Acesso em: 22 maio 2025.

CAMPBELL, Thomas A.; TIBBITS, Skylar; GARRETT, Banning. The Next Wave: 4D Printing Programming the Material World. **Atlantic Council**, 12 maio 2014. Disponível em: <https://www.atlanticcouncil.org/in-depth-research-reports/report/the-next-wave-4d-printing-and-programming-the-material-world/>

CANOPIC jar with a baboon-headed lid (Hapy). 664–525 a.C. 4 esculturas em cerâmica. Disponível em: <https://www.metmuseum.org/art/collection/search/550883>. Acesso em: 11 nov. 2025.

CLARK, Lygia. **Da obra ao acontecimento**: somos o molde, a você cabe o sopro. São Paulo: Pinacoteca do Estado; Nantes: Musée des Beaux-Arts de Nantes, 2005. Disponível em: https://monoskop.org/images/2/25/Lygia_Clark_da_obra_ao_acontecimento_2005.pdf. Acesso em: 11 nov. 2025.

CLARK, Lygia; OITICICA, Helio. **Lygia Clark - Helio Oiticica**: Cartas, 1964–1974. Organizado por Luciano Figueiredo. Prefácio de Silvano Santiago. 2. ed. Rio de Janeiro: UFRJ, 1998.

CLARK, William R. **Sexo e as Origens da Morte**. Rio de Janeiro; São Paulo: Record, 2006.

CONVIVENDO com Robôs. Curadoria de Zaven Paré. **Japan House**, São Paulo entre 14/11/2023 e 19/05/2024. Disponível em: <https://japanhousesp.com.br/exposicao/convivendo-com-robos/> Acesso em: 8 maio 2025.

CRAIK, Kenneth. **The Nature of Explanation**. Cambridge: Cambridge University Press, 1943.

CREASE, Robert P. How Schrödinger's Cat Got Famous. **Nautilus**, 5 jun. 2024. Disponível em: https://nautil.us/how-schrodingers-cat-got-famous-637677/?_sp=b645c2bd-cfdb-4df1-8f9d-24f0b3b2212.1717929397967 Acesso em: 5 maio 2025.

CRISTAL. Reciclagem é uma farsa? **Uma vida sem lixo**, 24 fev. 2021. Disponível em: <https://umavidasemlixo.com/2021/02/reciclagem-e-uma-farsa/> Acesso em: 22 abr. 2025.

DAMÁSIO, Antonio. **Self Comes to Mind: Constructing the Conscious Brain**. New York: Pantheon Books, 2010.

DEBUS, Allen George. **O homem e a natureza no renascimento**. Porto: Porto, 2002.

DELEUZE, Gilles; GUATTARI, Felix. **Mil Platôs**: v. 1 a 5. São Paulo: 34, 1995.

DELEUZE, Gilles; GUATTARI, Felix. **O que é a filosofia**. São Paulo: 34, 2010.

DEMAINE, Erik D.; TACHI, Tomohiro. Origamizer: a practical algorithm for folding any polyhedron. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON COMPUTATIONAL GEOMETRY, 33., 2017, Brisbane. **Proceedings** [...]. Brisbane: SoCG, 2017. Disponível em: <https://origami.c.u-tokyo.ac.jp/origamizer.html>. Acesso em: 5 maio 2025.

DOMINEC, Adam. Export paper model: Export printable net of a Mesh object. **Extensions Blender**, [2025]. Disponível em: <https://extensions.blender.org/add-ons/export-paper-model/> Acesso em: 5 maio 2025.

ENGEL, Peter. **Origami Odissey: A Journey to the Edge of Paperfolding**. North Clarendon: Tuttle, 2011.

ENGEL, Peter. **Origami, From Angelfish to Zen**. New York: Dover, 1994.

ENGELLEN, John. **StrandBeests by Theo Jansen**. 2015. 1 fotografia. Disponível em: <https://www.dedeceblog.com/2015/04/13/strandbeests-by-theo-jansen/>. Acesso em: 9 maio 2025.

EVERYTHING revolves around the figure. Internet Archive, [2025] Disponível em: https://web.archive.org/web/20130619210515/http://store.playmobilusa.com/on/demandware.store/Sites-US-Site/en_US/Link-Page?cid=PMFIGUR Acesso em: 8 maio 2025.

FABBRINI, Ricardo Nascimento. **O Espaço de Lygia Clark**. São Paulo: Atlas, 1994.

FEI, Lung-Jieh; SUJAN, Debnath. Origami Theory and Its Applications: A Literature Review. **International Journal of Social, Behavioral, Educational, Economic, Business and Industrial Engineering**, Hertfordshire, v. 7, n. 1, 2013. DOI: <https://doi.org/10.5281/ZENODO.1055421>.

FOGLIANO, Fernando. Arte e interação: linguagem e produção de significado. **Revista ARS**, São Paulo, v. 13, n. 25, 2015. Disponível em: <https://revistas.usp.br/ars/article/view/105528/104186>. Acesso em: 11 nov. 2025.

FREUD, Sigmund. **Interpretação dos Sonhos**. Direção de Jayme Salomão. 2. ed. Rio de Janeiro: Imago, 1987. v. 1 e 2.

GARCIA, Xoxitl. The Many Uses of Tessellation and Miura Folds. **Science Friday**, 17 mar. 2017. Disponível em: <https://www.sciencefriday.com/educational-resources/tessellation-and-miura-folds/>. Acesso em: 14 maio 2025.

GARDNER, Howard. Os padrões dos criadores. In: BODEN, Margaret A. **Dimensões da criatividade**. Porto Alegre: Artes Médicas Sul, 1999. p. 149–163.

GOLDSTEIN, Seth Copen; LEE, Peter; SMITH, Jonathan; WAGNER, Tom. **Realizing Programmable Matter (DARPA)**. Arlington: DARPA ISAT Study, 2006.

GOLDSTEIN, Seth Copen; MOWRY, Todd C. **Claytronics: An Instance of Programmable Matter**. Pittsburgh: Carnegie Mellon University, 2004.

GRAEBER, David. **O Anarquismo no Século XXI**. Tradução de Heitor Magalhães Corrêa. Rio de Janeiro: Rizoma, 2013.

GRANT, Edward. **Os Fundamentos da Ciência Moderna na Idade Média**. Porto: Porto, 2003.

GUZDIAL, Mark. The Core of Computer Science: Alan Kay’s “Triple Whammy”. **Computing Ed Research**: Guzdial’s take, 24 maio 2010. Disponível em: <https://computinged.wordpress.com/2010/05/24/the-core-of-computer-science-alan-kays-triple-whammy/>. Acesso em: 5 maio 2025.

HARRISON, Harry. **A oeste do Éden**. Lisboa: Gradiva, 1986.

HAWKES, E.; AN, B.; BENBERNOU, N. M.; TANAKA, H.; KIM, S.; DEMAINE, E. D.; RUS, D.; WOOD, R. J. Programmable matter by folding. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 107, n. 28, p. 12441–12445, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.0914069107>.

HENDERSON, Linda Dalrymple. The Image and Imagination of the Fourth Dimension in Twentieth-Century. **Configurations**, v. 17, n. 1, p. 131–160, 2009. Disponível em: <https://files.core.ac.uk/download/pdf/211341567.pdf>. Acesso em: 11 nov. 2025.

HIMANEN, Pekka. **The Hacker Ethic and the Spirit of Information Age**. New York: Random House, 2001.

HONDA, Isao. **The World of Origami**. Tokyo: Japan Publications, 1965.

HORNYAK, Timothy Henry. **Loving the Machine: The Art and Science of Japanese Robots**. Tokyo: Kodansha International, 2006.

JANSEN, Theo. Ja, we gaan het hebben over voortbewegen. U beweegt u voort. U is in dit geval uzelf. U beweegt uzelf voort, dus zich... **deVolkskrant**, 6 dez. 2003. Disponível em: <https://www.volkskrant.nl/wetenschap/voortbewegen~b45aa97d/>. Acesso em: 13 out. 2024.

JANSEN, Theo. Introduction. **Strandbeest**, 2022. Disponível em: <https://www.strandbeest.com/>. Acesso em: 12 nov. 2025.

KAMM teapot foundation. Disponível em: <https://kammteapotfoundation.org/chahakobi-ningyo-tea-serving-doll/>. Acesso em: 22 maio 2025.

KIDDLE. Disponível em: https://kids.kiddle.co/Image:Playmobil_popje_vrouwte_in_oranje_hesje_objectnr_66274-B.2.JPG. Acesso em: 19 maio 2025.

KOESTLER, Arthur. **The Act of Creation**. London: Penguin Books, 1989.

KROPOTKIN, Piotr. **Mutual Aid, A Factor of Evolution**. Kent, 1902.

KUHN, Thomas S. Comentários sobre a relação entre ciência e arte. In: KUHN, Thomas. **A Tensão Essencial**. Tradução de Marcelo Amaral Penna-Forte. São Paulo: UNESP, 2011. p. 361–373.

LANG, Robert J. **Folding Paper, The Infinite Possibilities of Origami**. Hong Kong: Tuttle Publishing, 2013.

LANG, Robert J. **Origami Design Secrets: Mathematical Methods for an Ancient Art**. Boca Raton: CRC Press, 2003.

LANG, Robert J. **Origami in Action: Paper Toys That Fly, Flap, Gobble, and Inflate**. 4. ed. New York: St. Martin's Griffin, 1997.

LANG, Robert J. Treemaker. **Robert J. Lang Origami**, 30 jan. 2025. Disponível em: <https://langorigami.com/article/treemaker/>. Acesso em: 5 maio 2025.

LAURENTIZ, Silvia. **Processos Computacionais Evolutivos na Arte**. São Paulo: ECA-USP, 2003.

LEOTE, Rosangella. **ArteCiênciaArte**. São Paulo: UNESP, 2015.

LESSIG, Lawrence. **Free Culture**. New York: The Penguin Press, 2004.

LOVELOCK, James. **As Eras de Gaia**. Aparecida: Campus, 1991.

MACHADO, Arlindo. **Pré-cinemas e pós-cinemas**. Campinas: Papirus, 2008.

MACHADO, Arlindo. **Repensando Flusser e as Imagens Técnicas**. São Paulo: Edusp, 1997.

MARGOLUS, Norman; TOFFOLI, Tommaso. **Cellular Automata Machines**. Cambridge: MIT Press, 1987.

MARGOLUS, Norman. TOFFOLI, Tommaso. Programmable Matter: Concepts and Realization. **Physica D: Nonlinear Phenomena**, v. 47, issues 1–2, p. 263–272, 1991. DOI: [https://doi.org/10.1016/0167-2789\(91\)90296-L](https://doi.org/10.1016/0167-2789(91)90296-L).

MASSUMI, Brian. **99 Theses on the Revaluation of Value: A Postcapitalist Manifesto**. Minneapolis: University of Minnesota Press, 2018.

MCEVOY, J. P.; ZARATE, Oscar. **Entendendo Teoria Quântica: um guia ilustrado**. São Paulo: LEYA, 2012.

MEIRA, Silvo; BURÉGIO, Vanilson; BORBA, Paulo; GARCIA, Vinicius; ALBUQUERQUE, Jones; SOARES, Sergio. Programming the Universe: The First Commandment of Software Engineering for all Varieties of Information Systems. *In: BRAZILIAN SYMPOSIUM ON SOFTWARE ENGINEERING*, 30., 2016, Maringá. **Proceedings** [...]. Maringá: Universidade Estadual de Maringá, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1145/2973839.2982567>. Acesso em: 5 maio 2025.

MENEZES, Karina Moreira. **Pirâmide da Pedagogia Hacker**. Salvador: EDUFBA, 2022.

MIURA FOLD. *In: WIKIPEDIA*. São Francisco: Fundação Wikimedia, 2025. Disponível em: https://en.wikipedia.org/wiki/Miura_fold. Acesso em: 18 nov. 2025.

MIURA, Koryo. Method of Packaging and Deploying of Large Membranes in Space. **The Institute of Space and Aeronautical Science Report**, n. 618, 1985.

MOLES, Abraham. **A Criação Científica**. São Paulo: Perspectiva, 2010.

MONOD, Jacques. **Chance and Necessity: An Essay on the Natural Philosophy of Modern Biology**. New York: Alfred A. Knopf, 1971.

MONTROLL, John. **Favorite Animals in Origami**. Nova York: Dover Publications, 1996.

MORAES, Daniel Seda Pereira de. **Origami e robótica: do plano ao tridimensional**. 2018. Dissertação (Mestrado em Artes Visuais) – Instituto de Artes, UNESP, São Paulo, 2018. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/154839>. Acesso em: 11 nov. 2025.

MOREIRA, Marco Antonio. Modelos Mentais. *In: ENCONTRO SOBRE TEORIA E PESQUISA EM ENSINO DE CIÊNCIAS - LINGUAGEM, CULTURA E COGNIÇÃO*, 1997, Belo Horizonte. **Anais** [...]. Belo Horizonte: Faculdade de Educação da UFMG, 1997.

MORONI, Artemis Maria Francelin Sanchez. **ArTEbitrariiedade: Uma Reflexão sobre a Natureza da Criatividade e sua Possível Realização em Ambientes Computacionais**. 2003. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003. DOI: <https://doi.org/10.47749/T/UNICAMP.2003.297394>.

NADARAJAN, Gunalan. Islamic Automation: A Reading of al-Jazari's The Book of Knowledge of Ingenious Mechanical Devices (1206). *In: GRAU, Oliver. Media Art*

Histories. Cambridge: MIT Press, 2007. p. 1–16. DOI: <https://doi.org/10.7551/mitpress/4530.003.0011>.

NAKASHIMA, Jo. **Jo Nakashima**: origami artist, [2025]. Disponível em: <https://jonakashima.com.br/>. Acesso em: 5 maio 2025.

NAKASHIMA, Jo. Origami moving cubes: seamless cubes version, no tape/glue. **Origami com Jo Nakashima**, 13 jul. 2019. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=D9LXv72VxYU>. Acesso em: 11 nov. 2025.

NELSON, Theodor Holm. **Literary Machines**: edition 87.1 [S. l.]: Publicado pelo autor, 1987.

NING, Huangsheng; LIU, Hong; MA, Jianghua; YANG, Laurence T.; HUANG, Runhe. Cybermatics: Cyber-Physical-Social-Thinking Hyperspace Based Science and Technology. **Future Generation Computer Systems**, v. 56, p. 504–522, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.future.2015.07.012>.

NINGYO, Karakuri. Tea Serving Doll. **Plastic Pals**, 28 ago. 2009. Disponível em: <https://youtu.be/a2mgv8zmJ1E>. Acesso em: 21 maio 2025.

NISHIYAMA, Yutaka. **Miura Folding**: Applying Origami to Space Exploration. Osaka: Osaka University Press, 2012.

O EXTERMINADOR do futuro 2: o julgamento final. **Internet Movie Database**, [2025]. Disponível em: <https://www.imdb.com/title/tt0103064/>. Acesso em: 5 maio 2025.

OITICICA, Jose. **A doutrina anarquista ao alcance de todos**. 5. ed. Rio de Janeiro: Achiamé, 2006.

ONN, Aldan Lawrence; ALEXANDER, Gary. **Cabaret Mechanical Theatre**: Understanding Movement and Making Automata. London: Covent Garden, 2013.

ORIZURU. In: WIKIPEDIA. São Francisco: Fundação Wikimedia, 2025. Disponível em: <https://en.wikipedia.org/wiki/Orizuru>. Acesso em: 20 maio 2025.

PAPADOPOULOS, Evangelous. Heron de Alexandria (c. 10-85 A.D.) In: CECCARELLI, Marco (ed.). **History of Mechanism and Machine Science**. Dodrecht: Springer, 2007. DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6366-4_9. p. 217–245.

PARA que serve o própolis. [S. l.: s. n.], 2024. Publicado pelo canal Nunca Vi 1 Cientista. Disponível em: <https://youtu.be/gJPP4WG5lp8?t=511>. Acesso em: 15 maio 2025.

PAREYSON, Luigi. **Os Problemas da Estética**. Campinas: Martins Fontes, 2001.

PÉREZ-ORAMAS, Luiz; BUTLER, Cornelia H. (org.). **Lygia Clark**: The Abandonment of Art, 1948–1988. Nova York: The Museum of Modern Art, 2014.

PLATÃO. **Timeu-Crítias**. Coimbra: Universidade de Coimbra, 2011.

POPOVA, Maria. Trailblazing Philosopher Susanne Langer on How Our Questions Shape Our Answers and Direct Our Orientation of Mind. **The Marginalian**, 21 abr. 2016. Disponível em: <https://www.themarginalian.org/2016/04/21/susanne-langer-philosophy-in-a-new-key-questions-answers/> Acesso em: 5 maio 2025.

POPPER, Karl R. **A Lógica da Pesquisa Científica**. São Paulo: Cultrix, 1974.

PRIGOGINE, Ilya; STENGER, Isabelle. **A nova aliança**. Brasília, DF: Editora UNB, 1991.

RAYMER, Dorian M.; SMITH, Douglas E. **Spontaneous knotting of an agitated string**. San Diego: University of California, 2007.

ROMANISHIN, John W.; GILPIN, Kyle; RUS, Daniela. M-blocks: Momentum-driven, magnetic modular robots. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTELLIGENT ROBOTS AND SYSTEMS, 13., Tóquio. **Anais [...]**. Tóquio: IEEE/RSJ, 2013. p. 4288–4295. DOI: <https://doi.org/10.1109/IROS.2013.6696971>.

ROZIN, Daniel. **Wooden Mirror**, 1999, 1 espelho. Disponível em: <https://www.smoothware.com/danny/woodenmirror.html> Acesso em: 5 maio 2025.

RUBINI, Ivete Pinheiro Lima. **Transviando Códigos: arte hacker como cuidado**. 2023. Tese (Doutorado em Artes) – Instituto de Artes, UNESP, São Paulo, 2023. Disponível em: <https://hdl.handle.net/11449/250978>. Acesso em: 11 nov. 2025.

RUCKER, Rudy. **The Fourth Dimension**. New York: Dover Publications, 2014.

RUCKER, Rudy. **The Ware Tetralogy**. Rio de Janeiro: Prime Books, 2013.

RUS, Daniela, SUNG, Cynthia. **Foldable Joints for Foldable Robots**. Cambridge: MIT Press, 2015.

RUS, Daniela; SUNG, Cynthia R.; MIYASHITA, Shuhei; GUITRON, Steven; LUDERSDORFER, Marvin. **An Untethered Miniature Origami Robot that Self-folds, Walks, Swims, and Degrades**. Cambridge: MIT Press, 2015.

HOSSENFELDER, Sabine. We Need to Stop Lying about Plastic — To Ourselves. **Science with Sabine**, 20 mar. 2024. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=XHQJwJgFEeI>. Acesso em: 22 abr. 2025.

SAGAN, Carl. **Cosmos**. Rio de Janeiro: Francisco Alves, 1982.

SAGAN, Carl. **O Mundo Assombrado Pelos Demônios**. São Paulo: Companhia de Bolso, 2006.

SALLES, Cecília de Almeida. **Redes de Criação - Construção da obra de arte**. Vinhedo: Horizonte, 2006.

SCHIFF, Joel L. **Cellular Automata: A Discrete View of the World**. Nova York: John Wiley & Sons, 2011.

SEDA, Daniel (Interaubis). Insetos modulares. **My Mini Factory**, 17 fev. 2020. Disponível em: <https://www.myminifactory.com/object/3d-print-insetos-modulares-modular-insect-112258>. Acesso em: 10 maio 2025.

SEDA, Daniel (Interaubis). ReciclETA. **Printable**, 23 dez. 2024. Disponível em: <https://www.printables.com/model/945549-recicleta>. Acesso em: 22 abr. 2025.

SEDA, Daniel (Interaubis). Toyart Parade. **Eu Crítico**, 10 dez. 2012. Disponível em: <https://eusouocritico.wordpress.com/2012/12/10/toyart-parade/>. Acesso em: 10 maio 2025.

SEDA, Daniel. Modorituk. **Daniel Seda**: artista multimedia, [2025a]. Disponível em: <https://www.danielseda.com/modorituk/>. Acesso em: 22 abr 2025.

SEDA, Daniel. Reciclagens. **Daniel Seda**: artista multimedia, [2025b]. Disponível em: <https://www.danielseda.com/reciclagens>. Acesso em: 22 abr. 2025.

SHŪSUI, Shimokōbe. **A Thousand Cranes and How to Fold Them (Senbazuru orikata)**. 1797. 1 livro impresso em xilogravura. Disponível em: <https://www.metmuseum.org/art/collection/search/78714>. Acesso em: 20 maio 2025.

SIMONDON, Gilbert. **On the Mode of Existence of Technical Objects**. Minneapolis: Univocal Publishing, 2017.

STRING of mushrooms. séc. XIX. 1 escultura em marfim. Disponível em: <https://www.metmuseum.org/art/collection/search/59683/>. Acesso em: 20 maio 2025.

T-1000. In: WIKIPEDIA. São Francisco: Fundação Wikimedia, 2025. Disponível em: <https://en.wikipedia.org/wiki/T-1000>. Acesso em: 15 nov. 2025.

TAVARES, Monica. Inter-relações entre Arte, Pesquisa e Ciência. In: PRADO, Gilberto; TAVARES, Monica; ARANTES, Priscila (org.). **Diálogos Transdisciplinares: Arte e Pesquisa**. São Paulo: ECA/USP, 2016. p. 66–89. Disponível em: <http://www.gilberttoprado.net/assets/dialogostransdisciplinares.pdf>. Acesso em: 11 nov. 2025.

TAVARES, Monica; HENNO, Juliana. A imprevisibilidade materializada pelos meios digitais. In: TAVARES, Monica; HENNO, Juliana; PITOL, André (org.). **Arte-Design-Tecnologia**. São Paulo: ECA/USP, 2020. p. 108–145. Disponível em: <https://www.eca.usp.br/acervo/producao-academica/002994986.pdf>. Acesso em: 11 nov. 2025.

TAVARES, Monica; PLAZA, Julio. **Processos Criativos com os Meios Eletrônicos: Poéticas Digitais**. São Paulo: FAEP-UNICAMP: Hucitec, 1998.

TSING, Anna Lowenhaupt. Margens Indomáveis: cogumelos como espécies companheiras. **Ilha: Revista de Antropologia**, Florianópolis, v. 17, n. 1, p. 177–201, 2015. DOI: <https://doi.org/10.5007/2175-8034.2015v17n1p177>.

TSING, Anna Lowenhaupt. **Viver nas Ruínas, Paisagens multiespécies no Antropoceno**. Brasília: Mil Folhas do IEB, 2019.

TUCKER, Emma. Dave Hakkens updates open-source Precious Plastic recycling machines. **Dezeen**, 14 abr. 2016. Disponível em: <https://www.dezeen.com/2016/04/14/dave-hakkens-updates-open-source-precious-plastic-recycling-machines/> Acesso em: 22 abr. 2025.

TURBOSUNSHINE youtube channel. Disponível em: <https://www.youtube.com/@TurboSunShine> Acesso em: 22 abr. 2025.

UENO, Thais Regina. **Do origami tradicional ao origami arquitetônico**: uma trajetória histórica e técnica do artesanato oriental em papel e suas aplicações no design contemporâneo. 2003. Dissertação (Mestrado em Desenho Industrial) – Faculdade de Arquitetura, Artes, Comunicação e Design, UNESP, Bauru, 2003. Disponível em: <https://www.faac.unesp.br/Home/Pos-Graduacao/Design/Dissertacoes/thaisueno.pdf>. Acesso em: 11 nov. 2025.

VASCONCELOS, Maria José V. de; FIGUEIREDO, José Edson F. **Tecnologia CRISPR-Cas para edição genômica**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2015. <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1039785/tecnologia-crispr-cas-para-edicao-genomica> Acesso em: 3 out. 2025.

VIVEIROS DE CASTRO, Eduardo; DANOWSKI, Deborah. **Há Mundo Porvir?** Ensaio sobre os medos e os fins. Florianópolis: Cultura e Barbárie, 2014.

VON BERTALANFFY, Ludwig. **Teoria Geral dos Sistemas**. Petrópolis: Vozes, 2010.

WIENER, Norbert. **Cibernética e Sociedade**: o uso humano de seres humanos. São Paulo: Cultrix, 1968.

WILSON, Greg. Mental Models and Formative Assessment. **Teaching Tech Together**: How to create and deliver lessons that work and build a teaching community around them, 2019. Disponível em: <https://teachtogether.tech/en/index.html#s:models> Acesso em: 5 maio 2025.

WISSNER, Alexander David. **Physically Programmable Surfaces**. Cambridge: Harvard University Press, 2007.

WOODCOCK, George. **História das ideias e Movimentos Anarquistas**. Tradução de Júlia Tettamanzy. São Paulo: L&PM Pocket, 2002. v. 1 e 2.

YAMADA, Thaís Regina Ueno. **Estruturas flat foldable em Bambu Laminado Colado baseadas em técnicas de dobra e corte do origami e do kirigami**. 2016. Tese (Doutorado em Design) – Faculdade de Arquitetura, Artes e Comunicação, UNESP, Bauru, 2016.

Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/server/api/core/bitstreams/0514043f-f094-405b-a178-b12251efd529/content>. Acesso em: 18 nov. 2025.

YORINAO, Hosokawa Hanzo. **Kiko zui (Illustrated Compendium of Clever Machines) / Karakuri zui (Illustrated Compendium of Automata)**. 1796. 3 livros ilustrados em xilogravura. Disponível em: https://ukiyo-e.org/image/bm/AN00036382_001_1. Acesso em: 12 nov. 2025.

YOSHIZAWA, Akira. **Origami Museum Animals**. Tokyo: Kamakura Shobo, 1987.

ZHANG HENG. In: **ENCYCLOPAEDIA BRITANNICA**. Chicago: The Britannica Group, 2025. Disponível em: <https://www.britannica.com/biography/Zhang-Heng>. Acesso em: 9 maio 2025.

ZHAO, Wei. **Interactive Robogami**, Cambridge: MIT Press, 2015.