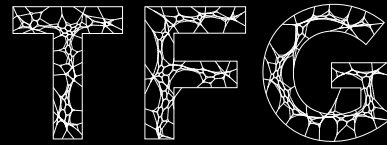


Daniel Nunes Locatelli



**ARQUITETURA
+BIOMIMÉTICA
+ALGORITMO**

Orientador:
Prof. Arthur Hunold Lara

São Paulo
2016

Agradecimientos

Foi uma longa jornada até eu concluir este curso de graduação e foram muitas as pessoas e instituições que tornaram isso possível. Primeiramente agradeço ao meu orientador Prof. Arthur Lara, que me direcionou a ter um pensamento “fora da caixa” e estimulou meus conhecimentos em uma área ainda pouco explorada no Brasil.

Gostaria de agradecer à Universidade de São Paulo pela infraestrutura e auxílios oferecidos, pois sem eles minha dedicação aos estudos estaria comprometida.

À minha mãe, meu pai e meu irmão que com sua confiança e suporte incondicionais me possibilitaram seguir um caminho inicialmente repleto de incertezas.

À Malu Motta e Vinicius de Jesus Correia por serem minha família em São Paulo e por me ajudarem sempre que possível.

Aos meus amigos Ana Costa, Denise Cordeiro, Gabriel Guerrero, Gustavo de Campos, Marina Frugoli, Pedro Fernandes e Rafael Becerra por terem me acompanhado durante os altos e baixos da graduação.

Aos amigos do Atelier Marko Brajovic que acreditaram no meu potencial e me permitiram crescer profissionalmente.

A Hully Machado, pela compreensão, confiança e companheirismo.

Sumário

Resumo	1	5 Proposta	45
1 Introdução.....	3	5.1 Local.....	47
1.1 Conceituação.....	5	5.2 Definição do Conceito.....	48
1.2 Design Computacional.....	7	5.3 Técnica	50
1.3 Conclusão.....	9	5.4 Desenvolvimento.....	69
2 Diretriz de Projeto	11	6 Detalhamento	77
2.1 Biomimética	12	6.1 Método Construtivo	78
2.2 Identificação do Problema	15	6.2 Transporte.....	80
2.3 Critérios de Seleção	17	6.3 Montagem.....	80
3 Estudos de Caso Algoritmo.....	19	6.4 Modelo Físico.....	81
3.1 Buckminster Fuller: Geodésica + Tensegridade.....	21	6.5 Render	87
3.2 Frei Otto: Pavilhão Alemão Expo 1967	25	7 Considerações Finais.....	89
3.3 Tomás Saraceno: Galaxies Forming Along Filaments..	29	8 Bibliografia.....	95
3.4 Achim Menges: Landesgartenschau Exhibition Hall	35	8.1 Artigos.....	96
4 Estudos de Caso Fabricação	39	8.2 Livros.....	96
4.1 Nós	41	8.3 Periódicos.....	97
4.2 Communal XL Lace Hammock	43	8.4 Teses e Dissertações.....	97
		8.5 Sites Relevantes.....	98

Resumo

”Trata-se de um estudo introdutório em torno das possibilidades da aplicação do design computacional na arquitetura com foco em *form finding* – a busca pela forma. Para tanto, foram levantados estudos de caso com grande relevância histórica, tecnológica e artística com o intuito de analisar seus respectivos processos de concepção através de engenharia reversa usando o *software* Rhinoceros 3D e seu *plug-in* Grasshopper. Verificou-se que a biomimética teve papel fundamental nos projetos pesquisados e, portanto, servirá de diretriz neste estudo. Por fim, para consolidar os conhecimentos absorvidos neste processo, foi proposto um pavilhão temporário para a FAU-USP”.

1 Introdução

“Making the world’s available resources serve one hundred percent of an exploding population can only be accomplished by a boldly accelerated design revolution”.
Buckminster Fuller

Este trabalho de conclusão de curso tem como objetivo principal desenvolver um estudo introdutório em torno das possibilidades da aplicação do design computacional na arquitetura. Para tanto, foi explorada uma bibliografia que possibilitasse ter uma visão geral das pesquisas mais recentes nesta área e, como consequência, isso resultou na descoberta de diversos *blogs* e fóruns *on-line* que formam atualmente uma comunidade pequena, porém extremamente ativa e colaborativa.

Conforme as pesquisas avançaram, foi possível perceber que a maioria das referências convergiam em um ponto: a biomimética. Por tanto, este tema foi também estudado para que fornecesse as mesmas bases de raciocínio desenvolvido por designers e arquitetos renomados neste campo.

No desenvolvimento foram levantados estudos de caso com grande relevância histórica, tecnológica ou artística para que então fosse proposta uma análise por meio de engenharia reversa usando o *software* Rhinoceros 3D e seu *plug-in* Grasshopper. Durante este processo, mesmo não reproduzindo os projetos com precisão, pôde-se entender quais foram os mecanismos de concepção de cada obra.

Para consolidar o entendimento sobre o tema, foi proposto um pavilhão para a FAUUSP com um programa de necessidades de baixa complexidade que permitisse utilizar e aperfeiçoar os vários algoritmos utilizados durante o estudo de engenharia reversa.

1.1 Conceituação

Por muitas décadas, os seres humanos têm usado os recursos do planeta terra de tal maneira que não será possível continuar sustentando esses excessos por muito tempo.¹ Estima-se, por exemplo, que no Brasil a construção civil produza em torno de 50 a 70% de toda a massa de resíduos sólidos urbanos.²

São diversos os motivos que impedem o avanço técnico dessa área; entre eles estão a especulação imobiliária, a instabilidade do mercado habitacional, a falta de alinhamento no processo de produção de pesquisas, entre outros.³ Segundo Ceotto, a última grande evolução no setor da construção civil brasileira ocorreu com a introdução do concreto armado no fim da década de 1920 e muito pouco mudou nas décadas seguintes:

“No Brasil, a Construção Civil de edifícios foi um dos setores da economia onde houve muito pouco desenvolvimento nas últimas décadas. Não seria exagero afirmar que, do ponto de vista sistêmico, se constrói hoje de forma muito semelhante do que há 70 anos atrás. A última grande evolução se deu com a introdução do concreto armado no país no fim da década de 20 [...]”.⁴

Na área da construção, a automação ainda anda a passos lentos, mas já existem diversas pesquisas envolvendo robôs⁵ ou mesmo drones⁶ capazes de assentar blocos, além de impressoras 3D capazes de construir edifícios inteiros⁷. Em meio a todo esse desenvolvimento tecnológico, a humanidade enfrenta um enorme déficit de moradias, e só no Brasil são 6,2 milhões de residências em falta⁸.



A metodologia artesanal de produção na construção civil do Brasil está sendo automatizada gradualmente. A questão não é se esse processo de construção artesanal – tijolo por tijolo – vai acabar, mas sim quando. Como consequência, será importante o desenvolvimento de novas práticas na produção arquitetônica de maneira a contrabalancear o uso desenfreado de recursos, e ao mesmo tempo acelerar a produção de projetos e construções de maneira a suprir a crescente demanda por novos edifícios.



1.2 Design computacional

Antigamente, em um projeto de arquitetura, cada pessoa era responsável por seus respectivos desenhos, ou seja, o desenvolvimento de um projeto dependia de desenhos individuais e desconectados. Porém, com o surgimento da Modelagem de Informação na Construção (BIM em inglês) e programas que usam o sistema “NURB” de modelagem, os projetos passaram a ser desenvolvidos de forma colaborativa. Atualmente várias pessoas podem trabalhar em um mesmo modelo digital e há um grande reaproveitamento de dados em todo o processo de produção de um edifício, fazendo com que a produtividade da equipe seja muito maior.

A introdução destas tecnologias dentro da indústria de AEC (arquitetura, engenharia e construção) possibilita o controle de todas as etapas da obra. Desde o processo de criação, simulações ambientais e de fluxo, controle de custos e prazos, fabricação e montagem de peças e muitas outras variáveis que podem ser ajustadas de acordo com o programa de necessidades e o capital investido em cada projeto.

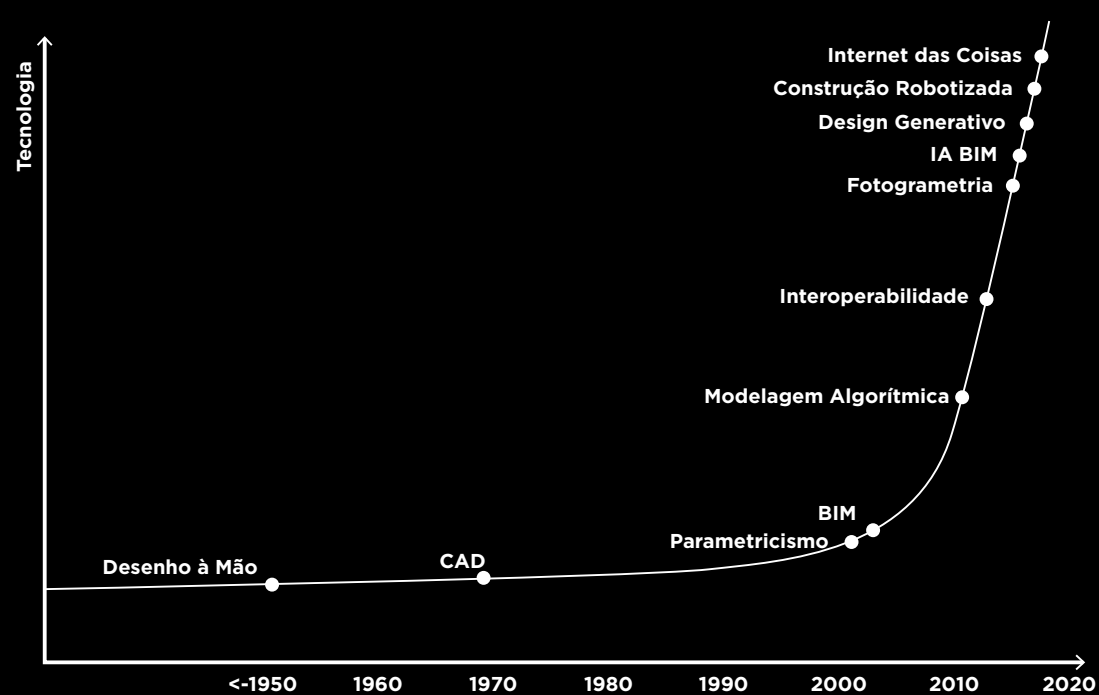
Mesmo após a obra estar concluída, pode-se usar os dados disponíveis para controlar e monitorar seu funcionamento durante todo seu ciclo de vida⁹.

Outro campo em pleno desenvolvimento é o da arquitetura algorítmica. Tradicionalmente, a palavra algoritmo refere-se ao processo de lidar com um problema seguindo um número finito de passos. Porém, atualmente, pode-se entender o algoritmo como um mediador entre a mente humana e o poder de processamento do computador¹⁰.

O mecanismo de *form finding*, expressão cunhada pelo arquiteto Frei Otto¹¹, pode ser entendido como um algoritmo, ou seja, um conjunto de instruções que determinam o resultado de uma forma final. Com isso, ao se alterar o valor de uma destas instruções, a forma final também se altera, possibilitando uma avaliação rápida e com grande potencial de otimização espacial e estrutural.

Com a invenção do computador, arquitetos e designers possuem agora uma maior capacidade de lidar com situações de grande complexidade. Formas geométricas, que antes levariam dias ou até mesmo meses para serem projetadas, podem agora ser produzidas em períodos muito mais curtos de tempo¹².

Apesar de este trabalho abordar a relação dos algoritmos apenas do ponto de vista do design e arquitetura, vale ressaltar que eles também tem grandes implicações teóricas dentro da filosofia, sociologia e outras artes¹³.



1.3 Conclusão

Como relatado, são muitas as variáveis que norteiam a concepção de um edifício. Atualmente, para levar em conta todas essas responsabilidades em um mesmo projeto, é necessária ou uma equipe enorme, ou muito tempo para se chegar em um resultado que não negligencie uma ou outra questão. É aí que o computador mostra todo seu potencial, ao automatizar variáveis objetivas e burocráticas, como plano diretor, código de obras, código de segurança e prevenção contra incêndio, insolação, ergonomia e documentação, acaba permitindo que o arquiteto foque em questões mais complexas, podendo se aprofundar em definições e conceitos subjetivos que o computador ainda não é capaz de lidar.

A computação abre uma nova dimensão para a arquitetura e o design, seu constante aperfeiçoamento tem grande potencial para ajudar a resolver os problemas citados anteriormente. Porém, os arquitetos precisam se dar conta da importância de seu papel como direcionadores desta inovação.

Este trabalho final não tem a pretensão de propor soluções para estes problemas, mas tem o intuito de servir como um complemento na formação do curso de Arquitetura e Urbanismo da USP. Ao entrar neste tema, o presente estudo passa a ser mais do que um simples comprovante de competência profissional, mas abre também um leque muito maior de possibilidades até então obscuras no meio acadêmico, onde ainda há pouco incentivo de pesquisa e ensino na área.

2 Diretriz de projeto

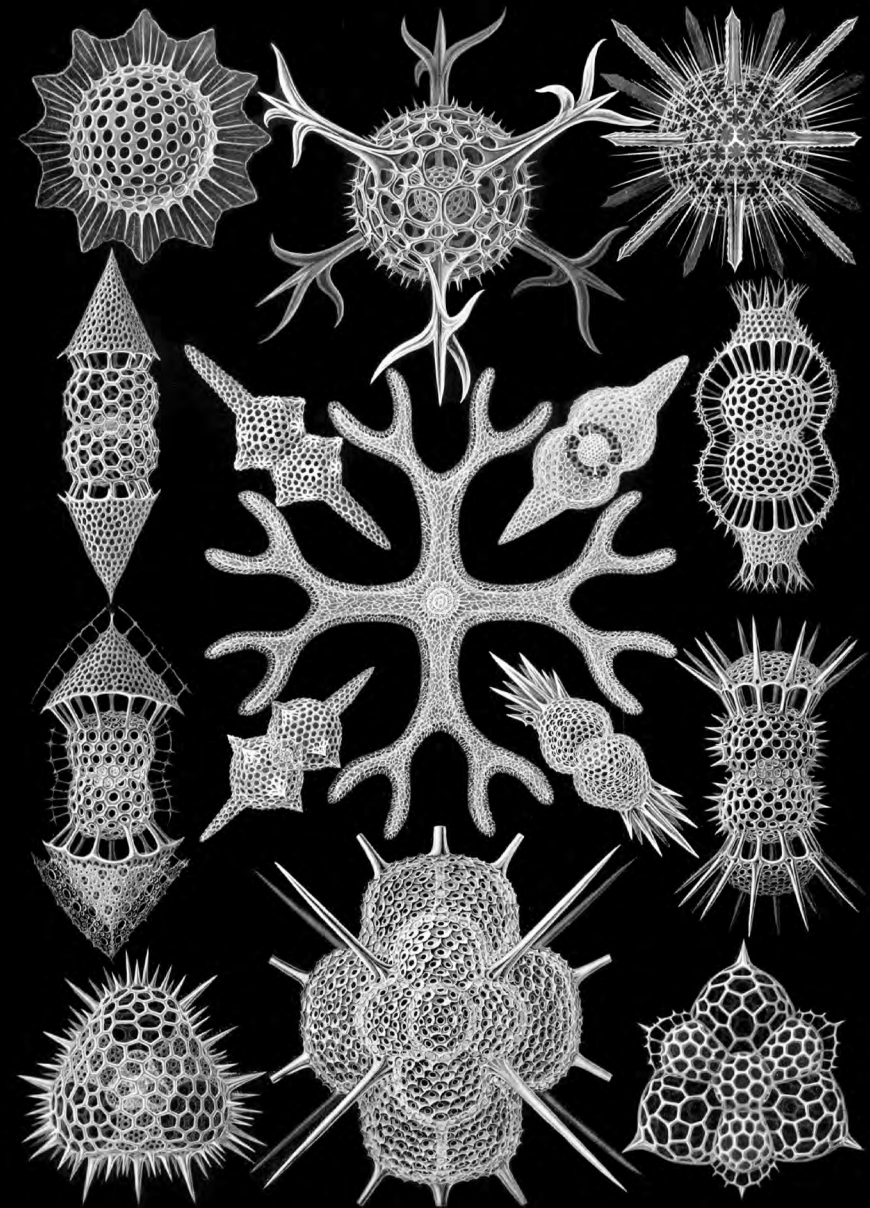
“Biology has become indispensable for architecture — but architecture has also become indispensable for biology”

Frei Otto

2.1 Biomimética

Aproximar-se da natureza como a diretriz principal de um projeto pode parecer só mais uma forma subjetiva de definição de partido. Porém, ao analisar os estudos de caso que seguirão, notou-se que eles possuíam algo em comum: a biomimética.

Existem três níveis de biomimética segundo Benyus. O primeiro mais superficial tenta simplesmente mimetizar as formas e padrões da natureza independente do método utilizado. Já o segundo explora os diversos processos que a natureza utiliza para se chegar ao resultado final, ou seja, as receitas de como fazer. E o terceiro e mais amplo nível é o de mimetizar ecossistemas naturais, entendendo que todos os indivíduos e elementos compõem uma única biosfera sustentável, interconectada e interdependente.¹⁵





5

Para Terzidis, em seu livro *Algorithmic Architecture*, ao se iniciar uma reflexão sobre o design, é necessário primeiro fazer uma reversão e ir em busca de sua origem. Segundo ele, esta reversão tem o propósito de explorar a visão filosófica pré-socrática que afirma que “nada vem do nada e nada volta ao nada” e tem como consequência a ideia de que a novidade em si é apenas uma ilusão sensorial.¹⁴

Para ele, existem dois caminhos que podem ser tomados em direção a uma novidade; o primeiro é a busca pela *inovação* que seria como “acrescentar folhas à árvore do conhecimento”, ou seja, desenvolver algo baseado em um a ideia que já se conhece. E o segundo, é a busca pela *originalidade*, que seria como “acrescentar raízes à árvore do conhecimento”, que significa abstrair ao máximo as informações existentes em busca de suas origens e descobrir algo que ainda não se conhece.

Nesse sentido, ao contrário do pensamento comum, a biomimética não aborda só uma questão formal, ela não é a justificativa do resultado. Muito pelo contrário, assim como Terzidis propões, ela direciona a busca pela origem do design.

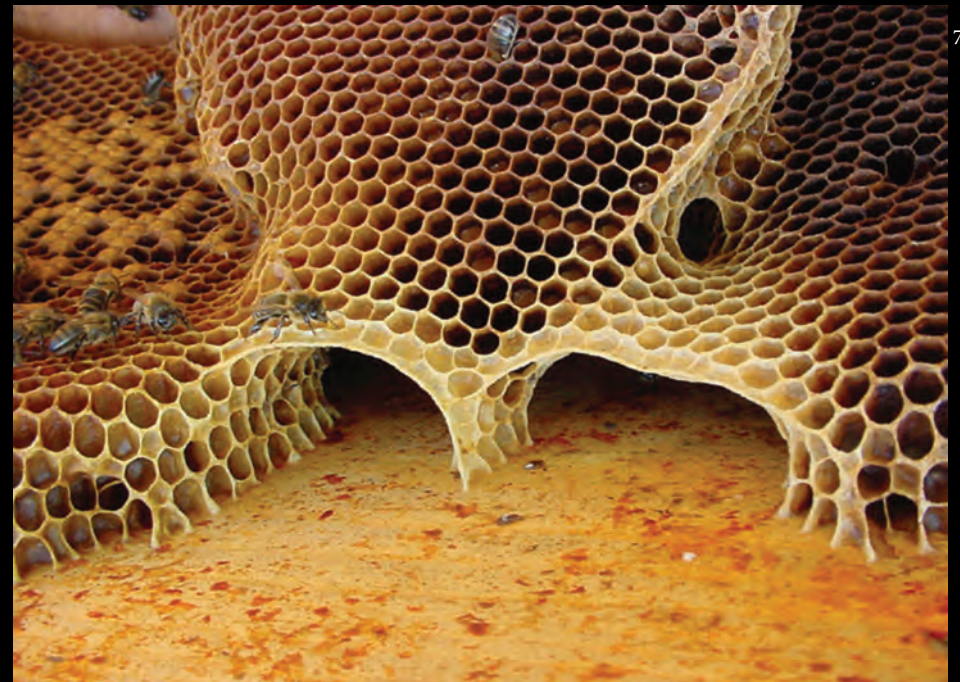
A arquitetura sustentável como é entendida hoje não é necessariamente a arquitetura natural a que Frei Otto se referia em seus estudos, por exemplo. Uma vez que entende-se que este resultado é a consequência de todo um processo racional de otimização inspirado na natureza. Frei Otto chamava este procedimento de caminho oposto e o levou a



6

desenvolver diversos estudos de *form finding*.¹⁶

Pode-se concluir que essa visão ocidental de que os humanos são uma espécie separada da natureza, inibe uma imensa possibilidade de exploração tecnológica com benefício mútuo homem-natureza.

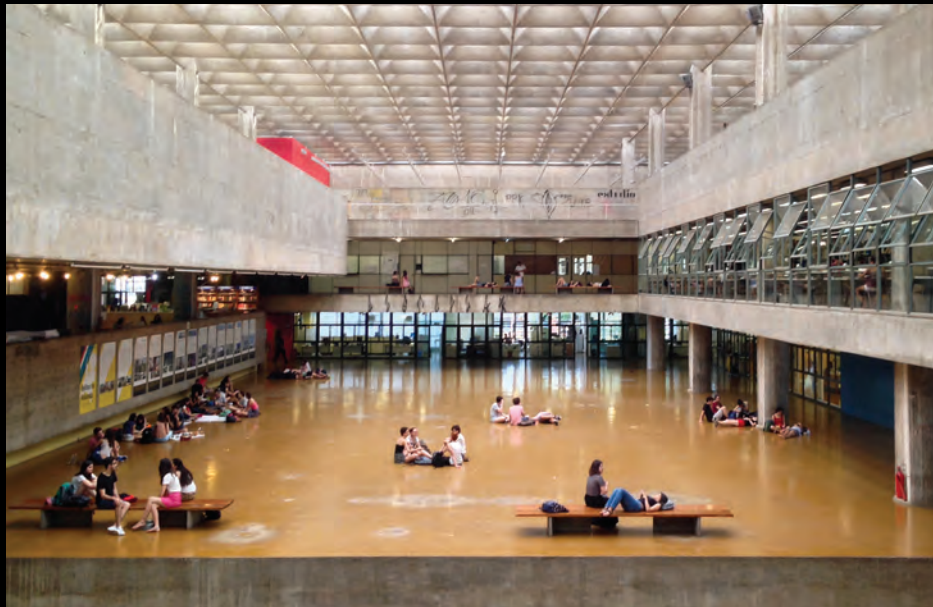


7

2.2 Identificação do problema

Como este trabalho se trata de uma investigação introdutória em torno das possibilidades do design computacional, buscou-se um projeto com programa de necessidades de baixa complexidade, permitindo assim uma imersão neste campo do conhecimento tecnológico com foco no desenvolvimento de algoritmos.

O projeto do prédio da FAU-USP é mundialmente conhecido pela sua arquitetura brutalista. Projetado por Vilanova Artigas e Carlos Cascardi, ele apresenta diversas qualidades espaciais importantes para uma escola de arquitetura, como áreas amplas e adaptáveis. No entanto, apesar de possuir ambientes com flexibilidade de uso, não foram acrescentados espaços de permanência para descanso.



8



9

Este tipo de espaço é indispensável em um curso que além de transcorrer em período integral, exige dedicação extra para finalizar os diversos trabalhos cobrados. Como consequência, os estudantes permanecem na faculdade por muito mais tempo do que o horário teórico proposto.

Portanto, decidiu-se para este trabalho final a proposta de um pavilhão temporário externo ao prédio, de forma a fornecer um ambiente de descanso e convivência para a comunidade da FAU-USP.



2.3 Critérios de seleção

Por fim, antes de se iniciar o estudo tanto do algoritmo quanto da sua forma de produção, foi importante ter em mente alguns objetivos e critérios no desenvolvimento. Afinal, é muito fácil se deixar levar pelas infinitas possibilidades deste tipo de técnica e acabar esquecendo que, acima de tudo, o estudo está sendo feito para melhorar a prática de arquitetura e ela, por sua vez, é feita para pessoas. Por esse motivo foram selecionados alguns critérios de modo a manter a direção dessa pesquisa voltada ao usuário.

2.3.1 Conforto

É importante levar em conta o tipo de material escolhido, insolação e ergonomia. O estudo da ergonomia é um dos mais importantes, pois o objetivo principal é que as pessoas se sintam confortáveis o suficiente para poder até mesmo tirar uma sesta depois do almoço. O resultado final deve então permitir variações para que os usuários possam ficar nas mais diversas posições: sentado, inclinado e deitado.

2.3.2 Otimização

A maneira de conceber o projeto deve possibilitar a otimização da forma e de sua estrutura. O algoritmo deve produzir um resultado final econômico e que use a menor quantidade de material possível.

2.3.3 Fabricabilidade

É fundamental que o projeto atenda às possibilidades de fabricação existentes. O projeto deve levar em conta as características e formas de produção disponíveis, e ser preferencialmente, pré-fabricado.

2.3.4 Respeito ao Patrimônio Histórico

Um outro ponto crucial é que este pavilhão seja temporário, visto que a FAU-USP é um edifício tombado e que, portanto, não permite qualquer tipo de intervenção permanente tanto em sua estrutura, como em seu entorno.

2.3.5 Identidade

Com a intenção de conectar a FAU-USP a outra maneira de pensar além da visão modernista estabelecida.

3 Estudios de caso

Algoritmos

Foi muito importante montar um banco de referências com projetos renomados e que usaram os princípios citados nos capítulos anteriores. Desta maneira, usando a técnica de engenharia reversa, buscou-se desenvolver algoritmos que criassem formas similares às dos projetos analisados, o que resultou em uma biblioteca de soluções algorítmicas para problemas que, apesar de estarem em diferentes contextos, possuem maneiras similares de serem solucionadas.

Os programas usados para fazer esses estudos foram o Rhinoceros, seu *plug-in* Grasshopper, além de diversos *plug-ins* para o próprio Grasshopper, como o Kangaroo Physics, Weaverbird e LunchBox.W

3.1 Buckminster Fuller: tensegridade

Por mais de cinco décadas, Buckminster Fuller desenvolveu soluções pioneiras que refletiam seu comprometimento com o potencial de inovação do design em criar novas tecnologias que fizessem “mais com menos”. Um de seus principais interesses ao longo de sua vida foi o de usar essas descobertas para revolucionar a construção e aperfeiçoar a habitação humana.

Em seus estudos de “geometria sinérgica”, Fuller buscou explorar os princípios do design na natureza. Neste processo, uma de suas invenções se destacou: o domo geodésico. Ele se caracteriza por ser uma estrutura leve, com ótimo custo-benefício, de fácil montagem e que pode cobrir grandes espaços sem a necessidade de colunas ou estruturas similares, pois distribui o estresse de forma eficiente.¹⁷

Uma outra linha de pesquisa de Fuller foi o desenvolvimento da tensegridade, termo cunhado por ele mesmo que une as palavras *tension* e *integrity*, ou traduzindo do inglês, tensão e integridade, ou seja, tensegridade.

A tensegridade é uma estrutura espacial autossustentável que se estabiliza através da tração. É composta por barras e cabos, sendo que cada barra é isolada e conectada a outras barras somente através de cabos tracionados. Seu estado de autoequilíbrio permite que sejam exploradas diversas abordagens de *form finding* com inúmeras aplicações na arquitetura e no design.¹⁸

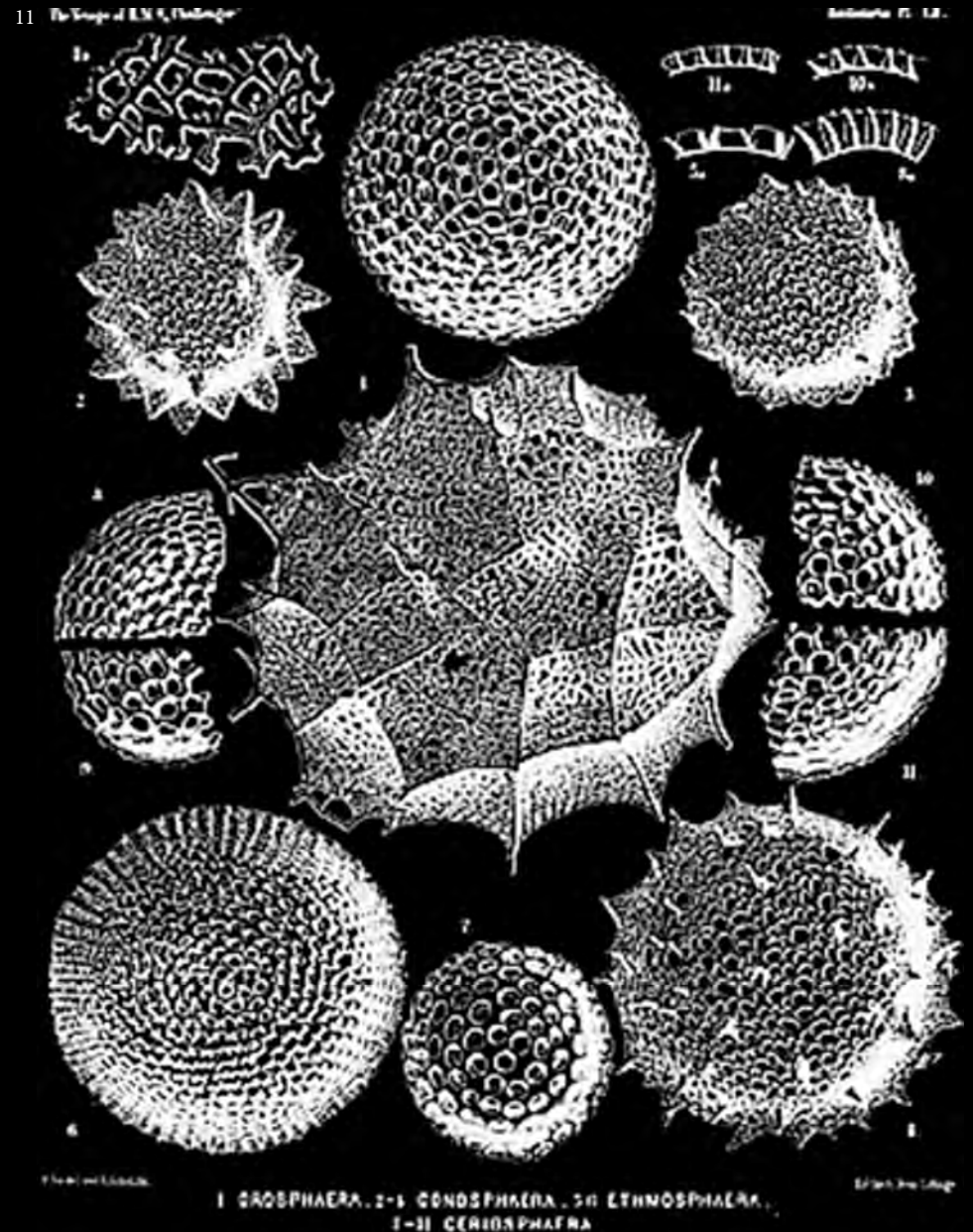


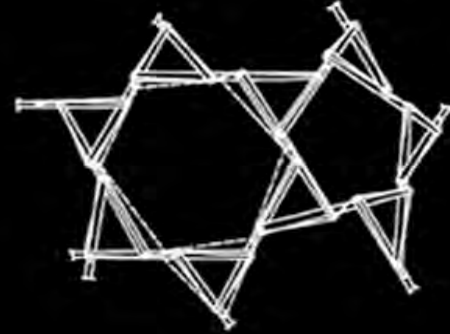
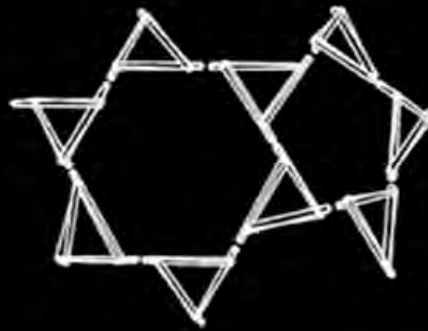
Para compreender a real ambição de Buckminster Fuller, é conveniente ler sua descrição de registro de patente da tensegridade:

“Ela (tensegridade) possui aplicações especiais em estruturas de grande proporção como domos, com vão livre capaz de cobrir um estádio ou abrigar uma vila ou cidade completamente (...) é também aplicável à estruturas geodésicas como descrito e reivindicado por minha patente anterior N^o. 2.682.235”¹⁹

Este primeiro estudo de caso busca replicar justamente esta tensegridade com formato de geodésica citada no resumo da patente. O objetivo principal foi o de se aproximar dos estudos geométricos de Fuller, mas também foi fundamental para entender o funcionamento do simulador de física Kangaroo Physics, *plug-in* do Grasshopper. Este componente recriar condições físicas existentes no mundo real, por exemplo, a gravidade e a elasticidade dos materiais.

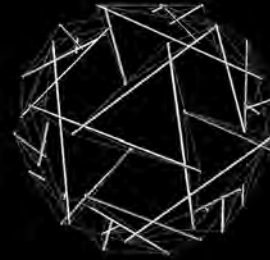
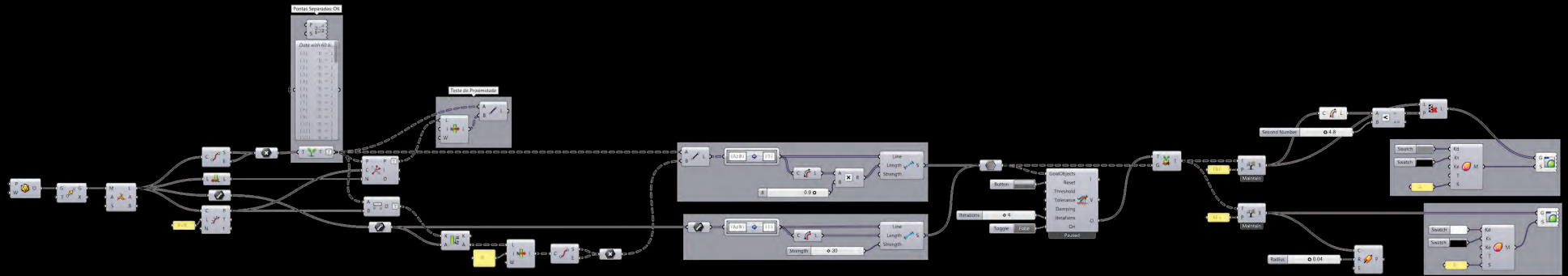
Como as tensegridades funcionam basicamente por tração de cabos e compressão de barras, essa foi uma ótima oportunidade para iniciar os estudos de *form finding*.





ALGORITMO

Tensegridade



3.2 Frei Otto: pavilhão alemão da Expo 1967

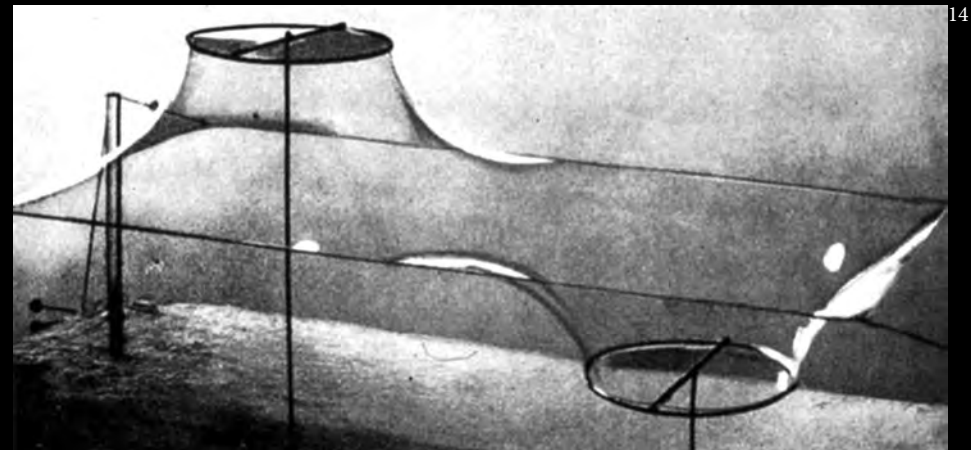
Buckminster Fuller e Frei Otto possuíam uma ideologia similar em torno de suas pesquisas, ambos viam em suas obras “(...) uma solução arquitetônica barata, durável e altamente versátil”.²⁰ Como cientista, Otto passou sua vida toda estudando o processo de *form finding* na natureza, e como arquiteto ele usou estes processos para desenvolver e construir diversas estruturas.²¹

O projeto do pavilhão alemão da Expo 1967 foi escolhido como estudo de caso por ser o marco em que Frei Otto finalmente apresentou seus experimentos de arquitetura leve para o mundo. Apesar de o pavilhão ter sido desenvolvido em colaboração com o arquiteto Rolf Gutbrod e por uma equipe grande e interdisciplinar, foram as pesquisas de Otto, acumuladas por vários anos, que guiaram sua concepção.^{22,23}

A maioria de suas pesquisas utilizavam modelos físicos com o objetivo de construir estruturas com área mínima, investigar forças e caminhos de tensão e entender processos de autoformação. Os modelos de Otto simulavam problemas

de maneira que suas variáveis poderiam ser alteradas quantas vezes fossem necessárias até que se conseguisse atingir condições estruturais e espaciais otimizadas. Experimentos com borracha e filme de sabão, por exemplo, ajudaram a criar superfícies mínimas que eram empregadas em estruturas de membranas tensionadas e também em construções com rede de cabos.²⁴

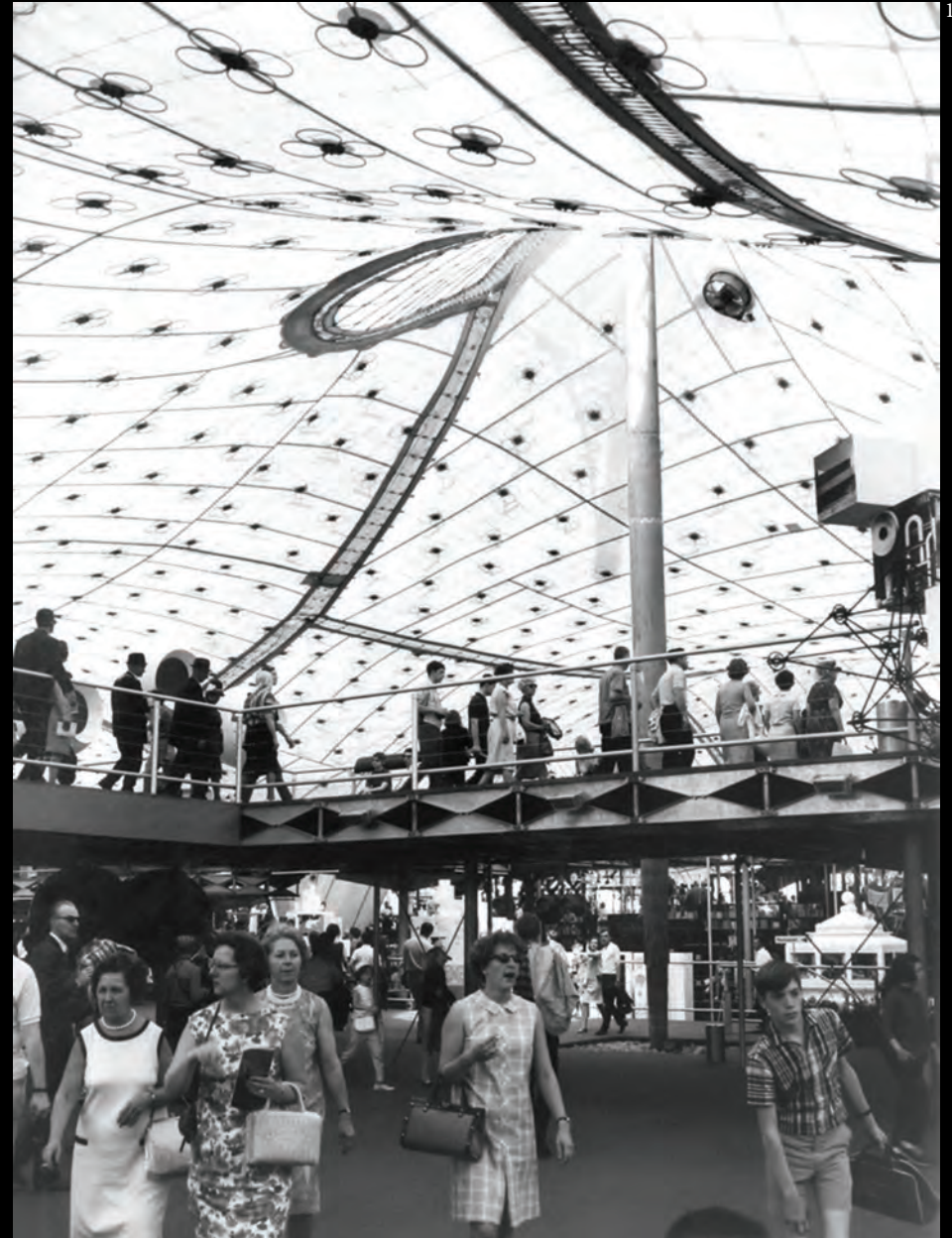
Para simular o comportamento dos filmes de sabão, foi utilizado um método conhecido como relaxamento de malha com Grasshopper e também com o auxílio do simulador

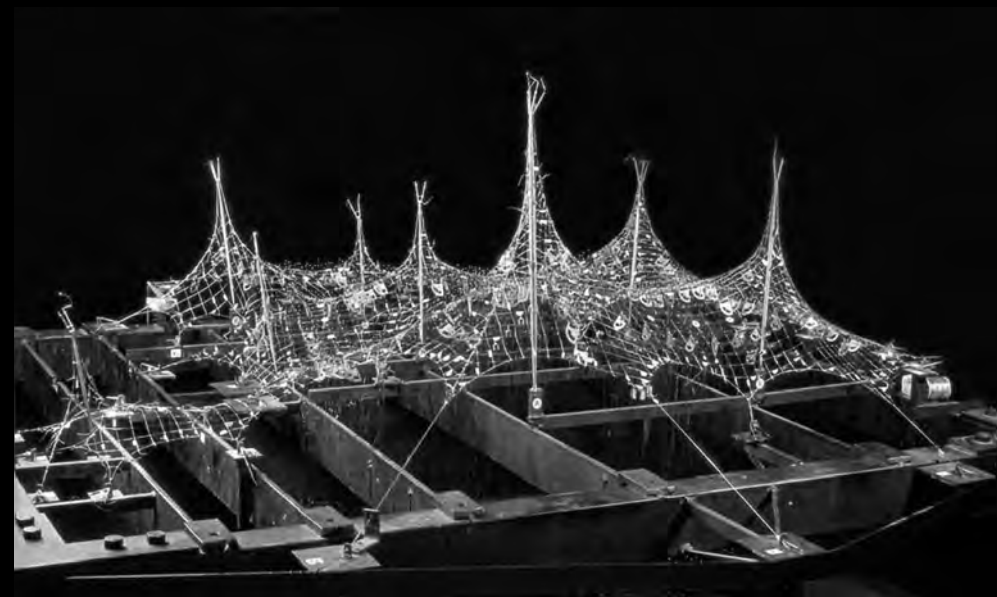
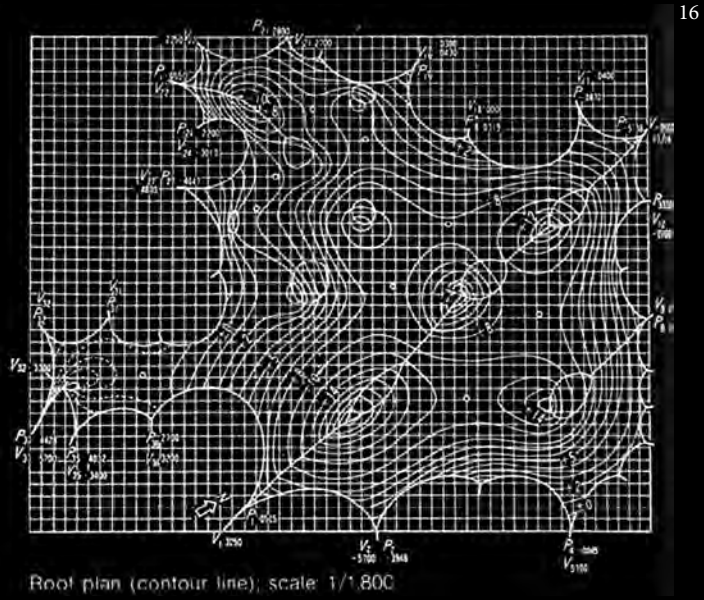


de física Kangaroo Physics. Ou seja, a malha inicial é alterada de tal modo que cada segmento perde sua “rigidez” e passa a se deformar de maneira a chegar em um equilíbrio de forças. O algoritmo final apresenta um refinamento na malha para evitar aberrações na topografia, deixando-a uniforme.

É importante reforçar que este algoritmo é uma aproximação da superfície mínima de um filme de sabão e não uma reprodução fiel, pois assim sendo ela restringiria a forma de modo que seria impossível ter pontos agudos similares ao projeto do pavilhão.

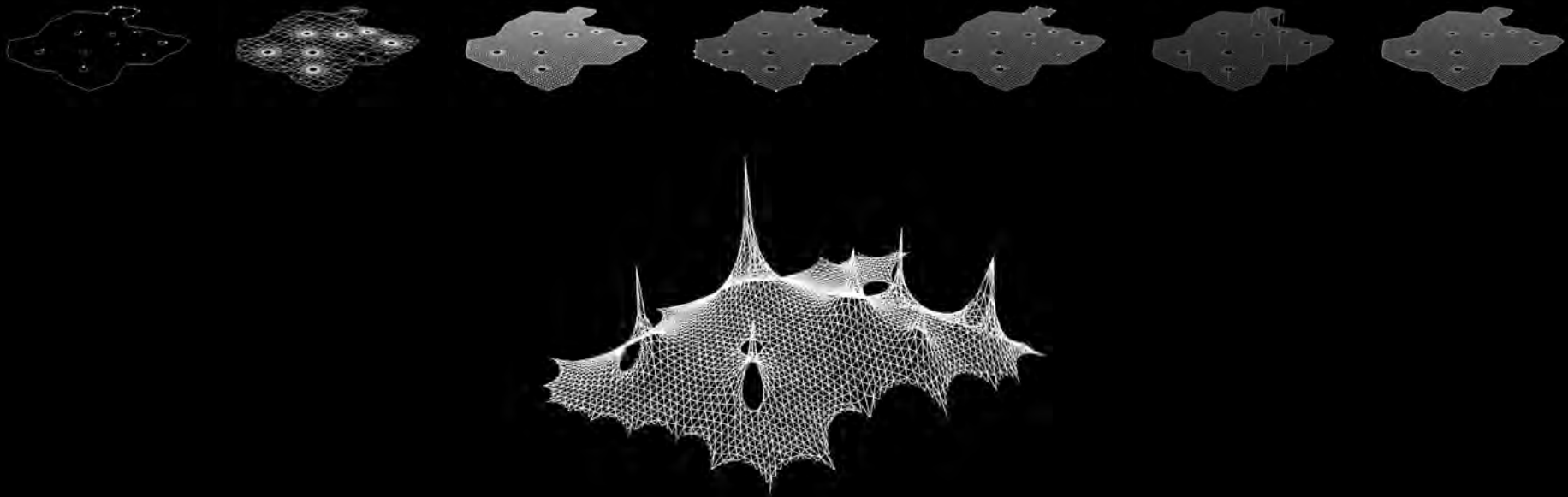
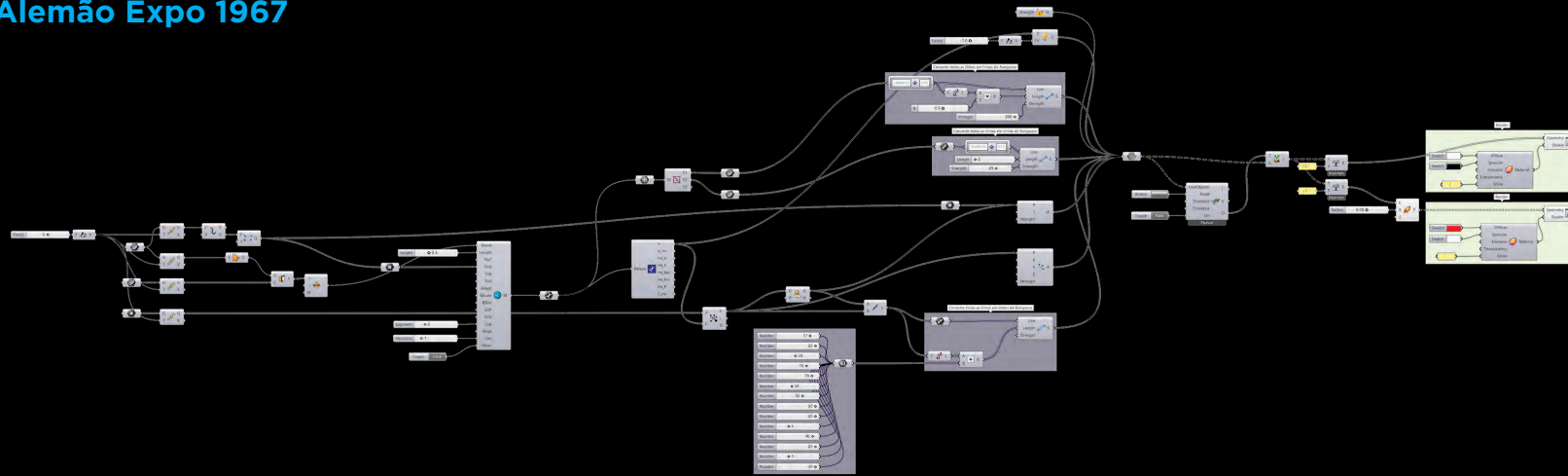
O principal proveito deste estudo de caso foi devido à necessidade de aprender a manipular malhas topográficas e desenvolver um método de *form finding* similar ao de Otto.





ALGORITMO

Pavilhão Alemão Expo 1967



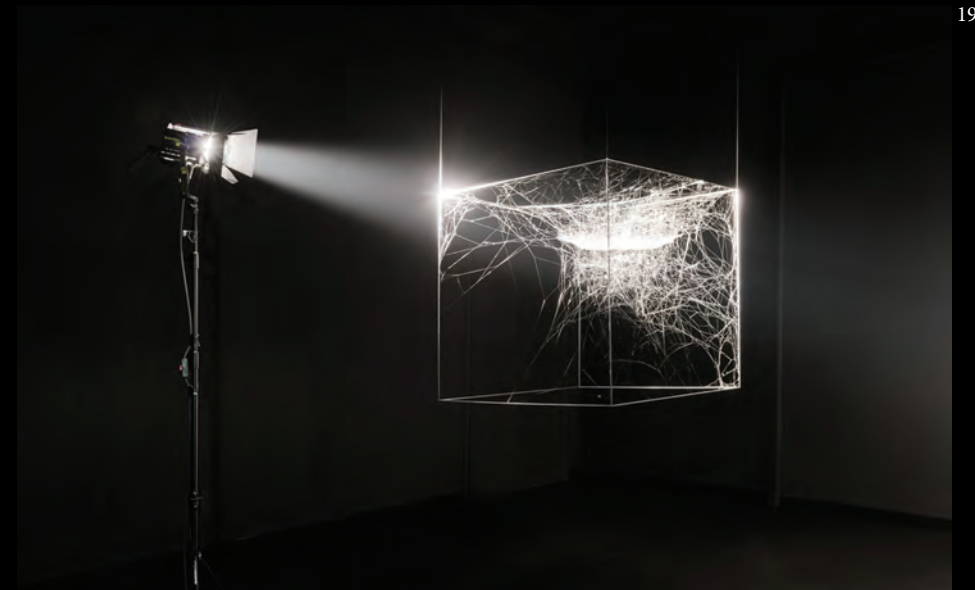
3.3 Tomás Saraceno: *galaxies forming along filaments*

Assim como os arquitetos citados anteriormente, as preocupações de Saraceno surgem da ansiedade contemporânea a respeito do esgotamento de recursos do planeta e sua conservação.²⁵

O conceito de Tomás Saraceno sobre arquitetura é extremamente amplo. Seu interesse por esta área é fruto de sua fascinação por teorias utópicas e constelações astronômicas. Durante os últimos 10 anos, ele vem imaginando e criando diversos protótipos que refletem novas formas de enxergar a natureza na busca por uma prática mais sustentável e emancipatória na arquitetura ao propor, por exemplo, uma cidade flutuante, modular e transnacional.²⁶

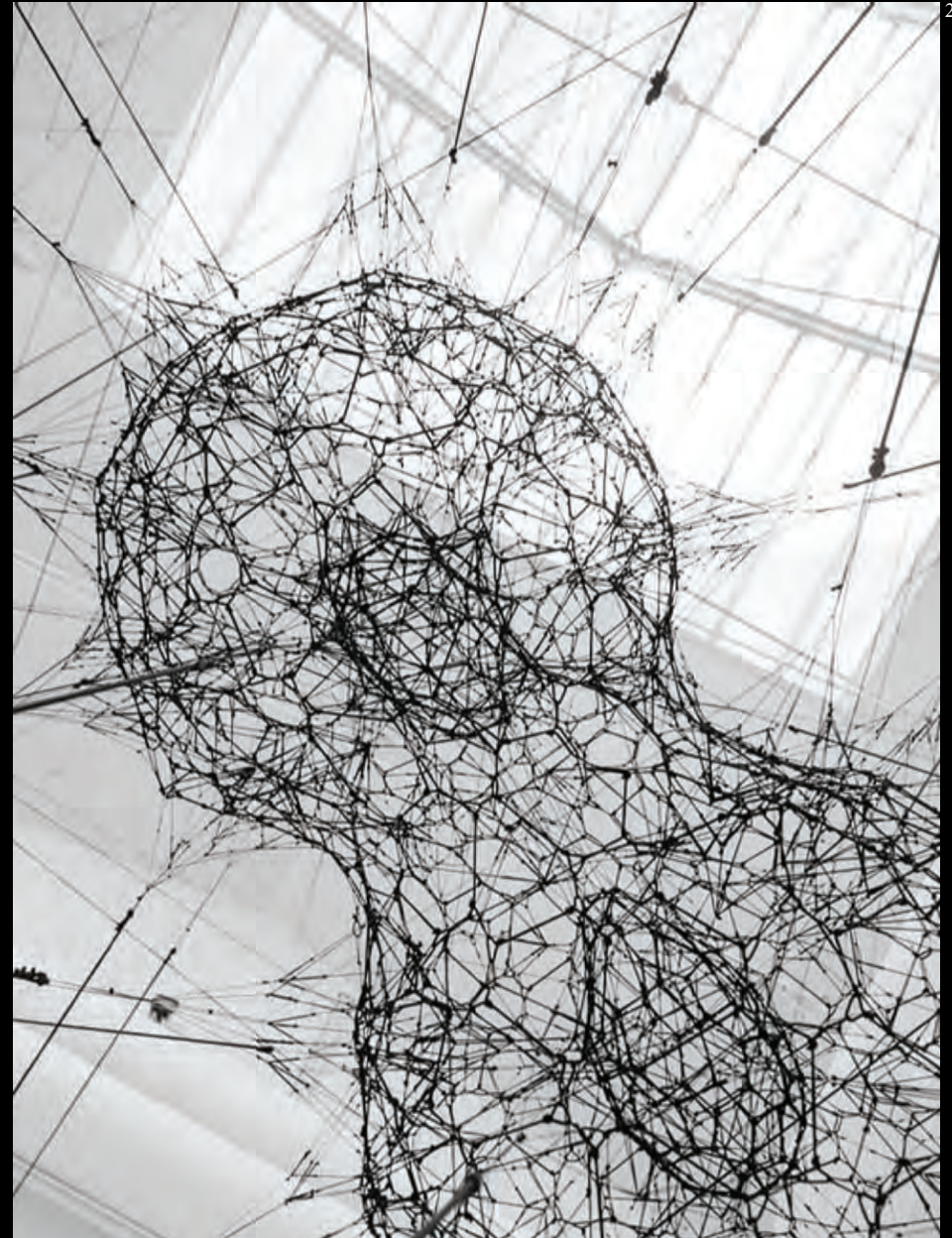
Saraceno também possui uma grande fascinação por teias de aranha, e já possui diversas pesquisas tanto sobre o processo de desenvolvimento da estrutura das teias, quanto sobre sua geometria final. Uma de suas pesquisas, buscou digitalizar através de tomografia suportada por laser a formação geométrica de uma teia de aranha da viúva negra (*Lactradectus mactans*).²⁷

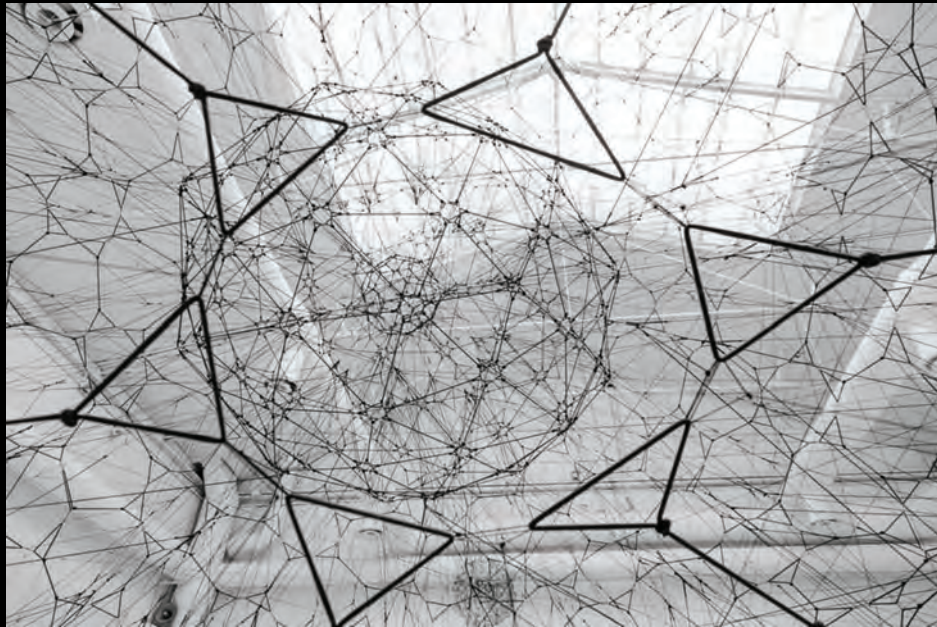
Sua inspiração na natureza o levou a propor diversas instalações artísticas que exploram a ideia da biomimética. Neste estudo de caso *Galaxies forming along filaments* Saraceno usa como ponto inicial a teia de aranha que, com sua complexa geometria, é capaz de suspender pesos extremamente altos.



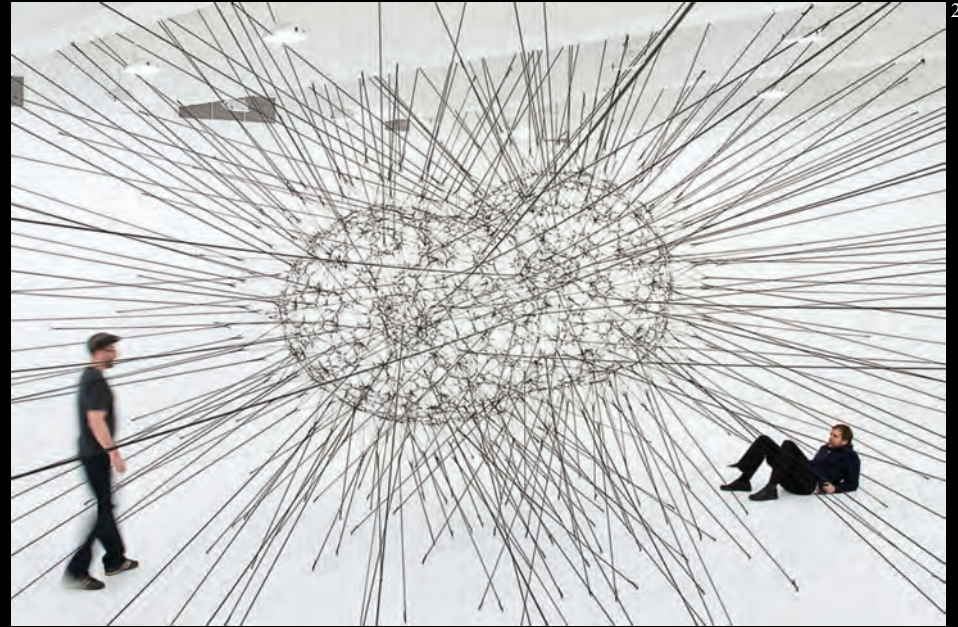
Para desenvolver este estudo de caso, foi necessário investigar o projeto de duas maneiras. A primeira com uma aproximação mais formal, pois foi necessário entender qual foi a lógica geométrica das esferas, enquanto a segunda explorou o processo de concepção e, para isso, foi necessária a aplicação do Galapagos, um algoritmo evolutivo dentro do Grasshopper, de modo a otimizar a quantidade de fios necessária sem afetar a forma final.

Este estudo de caso foi especialmente importante por exigir uma aproximação utilizando o Galapagos. Com ele foi possível uma introdução sobre o funcionamento deste tipo de algoritmo inspirado na natureza e possibilitou vislumbrar o grande potencial que ele tem em servir não somente como uma ferramenta, mas como solucionador de problemas que até então era necessário um trabalho extensivo por parte dos arquitetos.





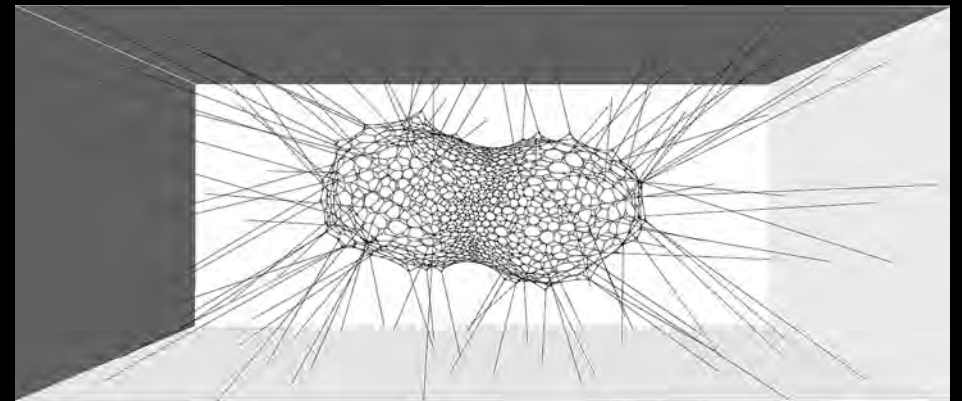
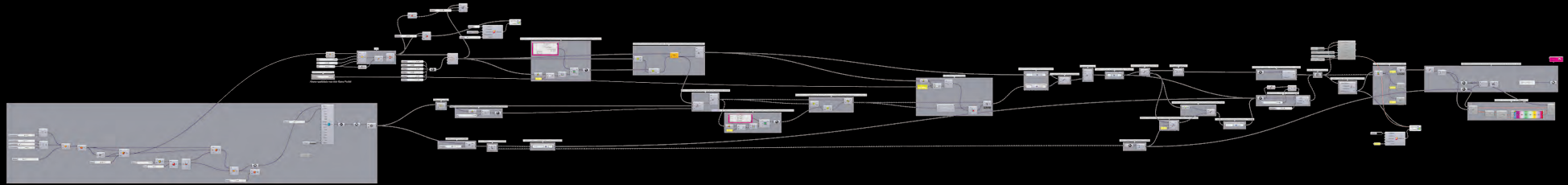
21

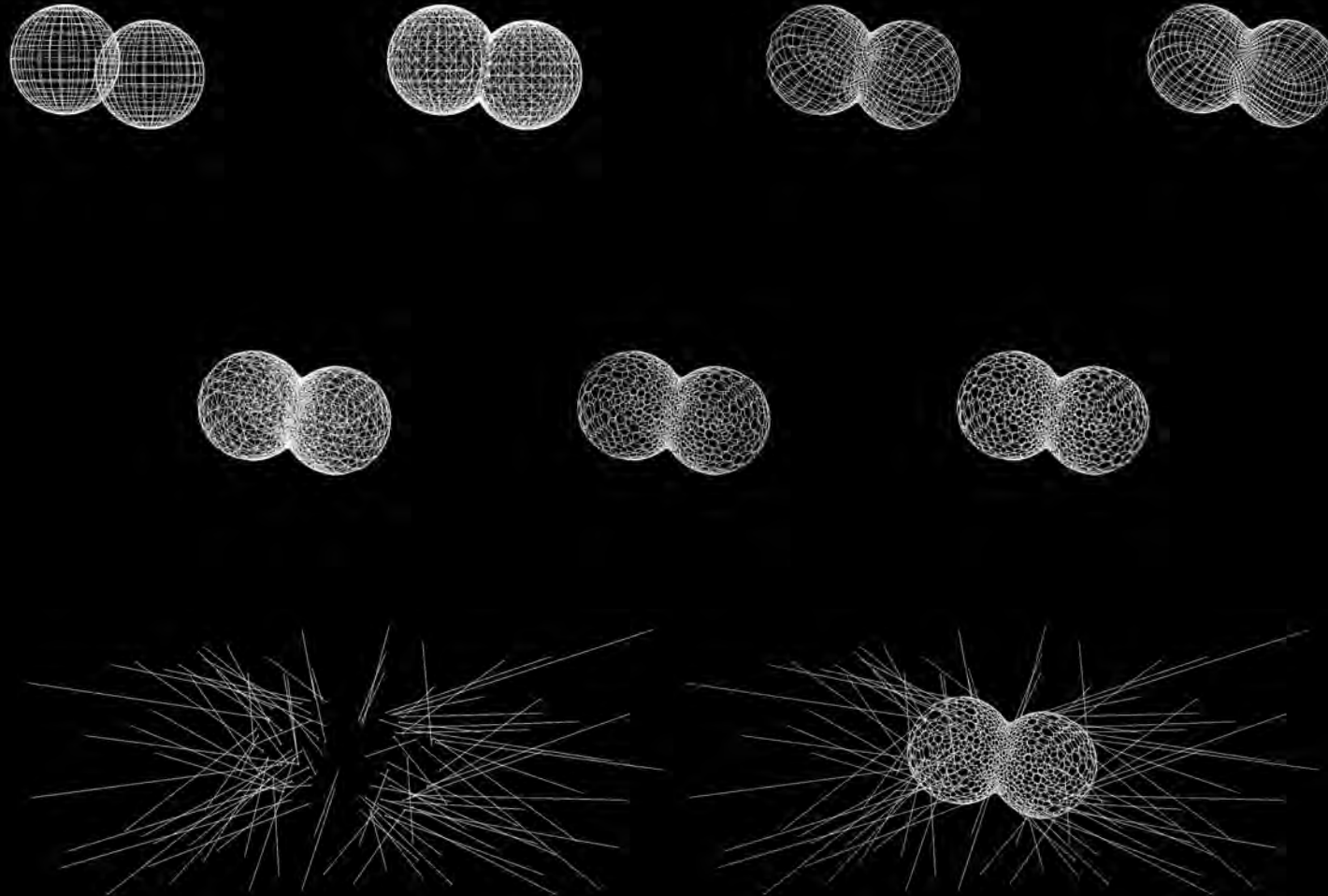


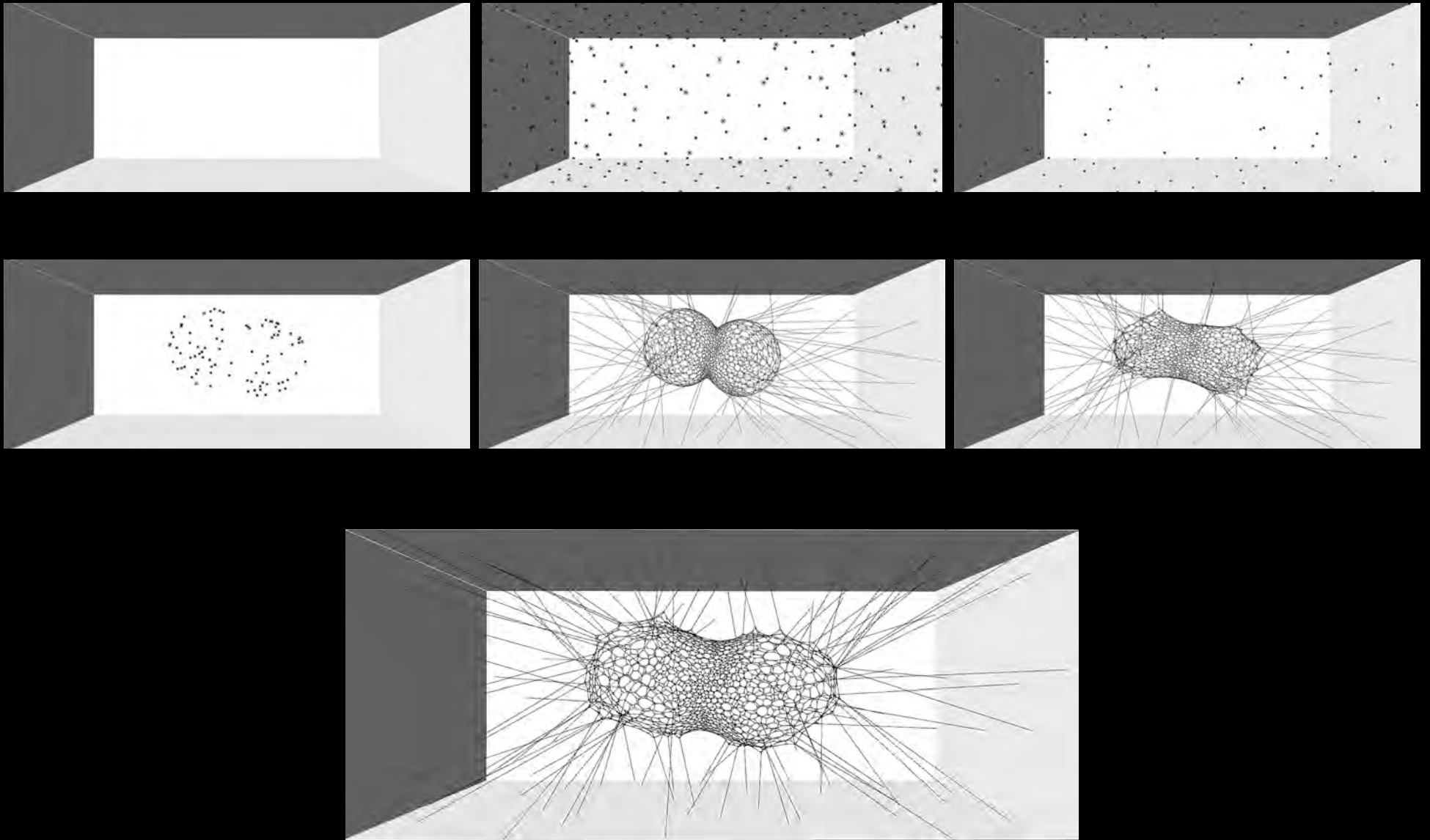
22

ALGORITMO

Galaxies Forming Along Filaments







3.4 Achim Menges: Landesgartenschau exhibition hall

Achim Menges é diretor fundador do Instituto de Design Computacional (ICD) na Universidade de Stuttgart desde 2008, uma das instituições com maior reconhecimento na área de design computacional e fabricação por robôs; não por coincidência esta foi a mesma universidade em que Frei Otto lecionou durante 26 anos.²⁸

Menges tem liderado diversas pesquisas com tecnologias de ponta que combinam design morfo-genético, engenharia biomimética, e fabricação digital. Isso resulta em pesquisas interdisciplinares, com colaboração de engenheiros estruturais, cientistas da computação, cientistas de materiais e biólogos.²⁹

São diversos os pavilhões desenvolvidos no ICD da Universidade de Stuttgart, no entanto, o *Landesgartenschau exhibition hall* foi escolhido principalmente por dois motivos: Primeiro por sua materialidade, já que é de madeira, um material muito mais simples e acessível em relação aos outros pavilhões que usam, por exemplo, fios de fibra de carbono em sua produção. A outra motivação foi porque este tipo de padrão hexagonal planificado é amplamente abordado em fóruns

on-line, então essa foi uma ótima oportunidade para adentrar nesta discussão tão recorrente.

A inspiração deste projeto veio das conchas das bolacha-da-praia, pois elas apresentam peças individuais conectadas por junções similares ao encaixe de madeira do tipo “dedos”. A estrutura do pavilhão é composta por placas de compensado inteiramente pré-fabricada por robôs que conseguem um eficiente aproveitamento da matéria-prima. Tudo isso só é possível devido à integração entre o design computacional, simulações e métodos de levantamento topográficos.³⁰



Para a produção deste algoritmo, foi utilizado o simulador de física Kangaroo Physics e diversos outros componentes do Grasshopper. Além disso, o conhecimento e parte do algoritmo resultante do estudo de caso anterior do Tomás Saraceno foi reaproveitado para este projeto, possibilitando a criação de um padrão básico hexagonal rapidamente.

No entanto, apesar de aparentar certa simplicidade formal, não foi possível chegar a um resultado satisfatório quanto à planificação das superfícies hexagonais. O estudo se deparou com um problema que exigiria habilidade de programação, impossível de ser desenvolvida no breve período de tempo de realização deste estudo. A questão consiste na relação entre a curvatura do pavilhão e o formato do padrão das placas de compensado. Ao analisar as imagens do projeto original, nota-se que em suas partes côncavas as placas também apresentam um hexágono côncavo, ou seja, o padrão da malha hexagonal deveria se alterar de acordo com a curvatura do pavilhão, o que não foi possível alcançar neste estudo.³¹





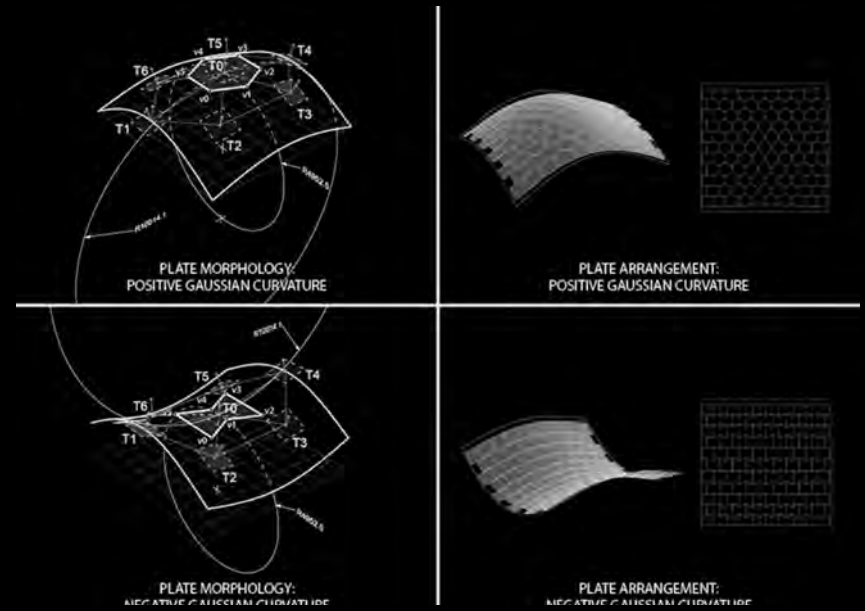
25



26



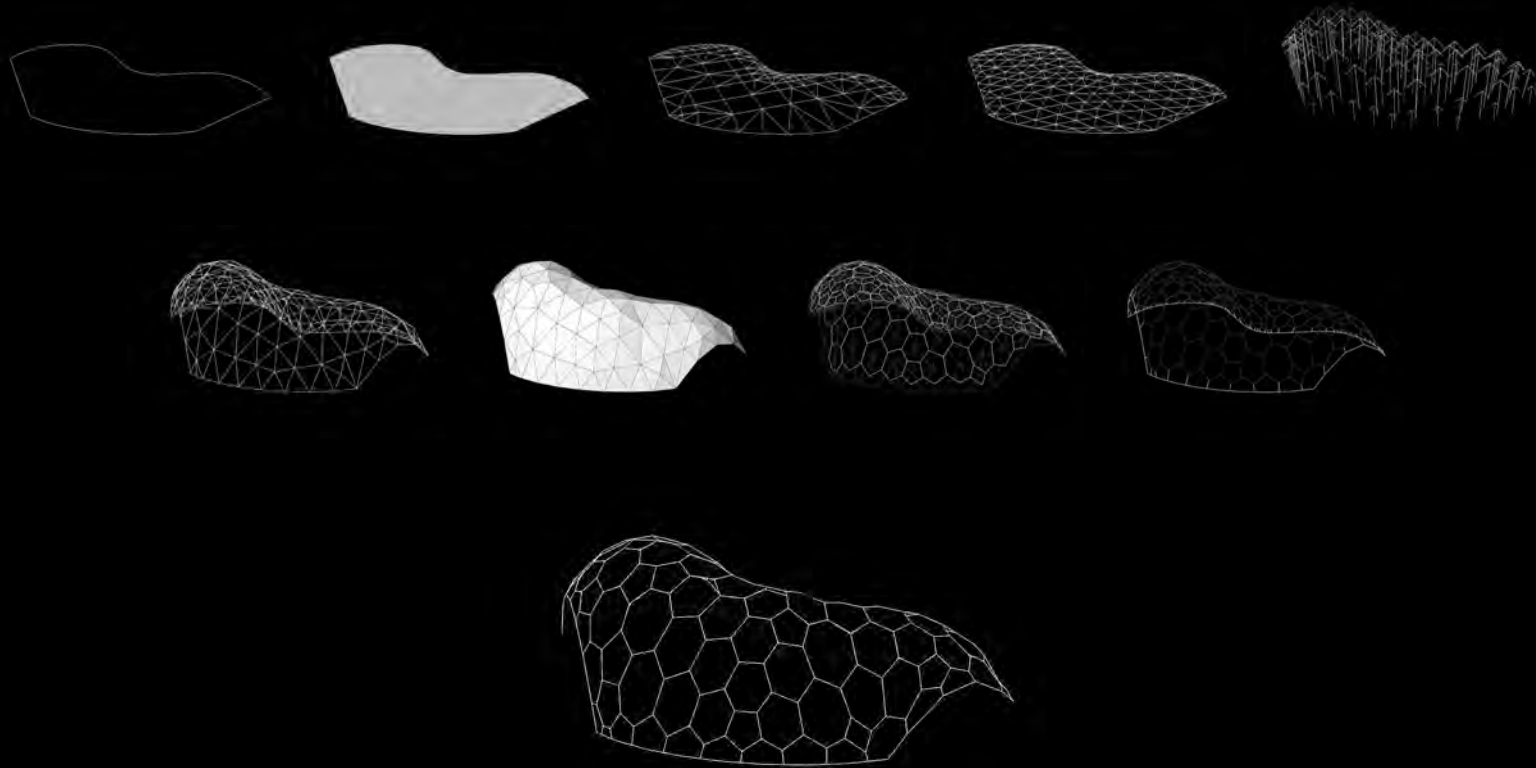
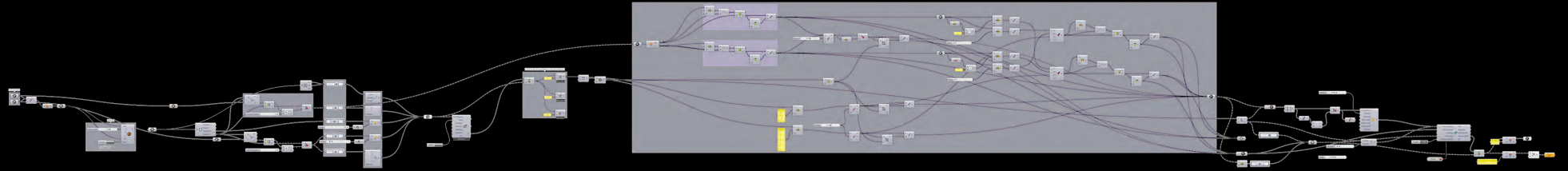
27



28

ALGORITMO

Landesgartenschau Exhibition Hall



4 Estudos de caso

Fabricação

Além dos estudos de caso envolvendo algoritmos, também foi importante buscar referências de como se daria a fabricação do pavilhão. Assim, foram levantados projetos que poderiam fornecer alternativas para sua produção. Ou seja, projetos que de acordo com a realidade da FAU-USP e disponibilidade de materiais, haveria uma possibilidade tangível de produção deste pavilhão.

4.1 Nós

O festival *Land-shape* foi uma iniciativa cultural dinamarquesa que aconteceu entre os anos de 2013 a 2016 e selecionou diversos artistas interessados em apresentar intervenções na paisagem. A edição de 2015 contou com um grupo formado por três estudantes da FAU-USP que se uniram em torno de uma ideia: a intervenção “Nós”.³²

O conceito desta intervenção consistiu em, a partir da cultura pesqueira da Dinamarca e do Brasil, desenvolver uma rede feita com nós típicos de pescadores e que pudesse ser desenvolvida em conjunto com toda a comunidade local. O objetivo deste projeto foi o de fixar a rede em um marco arquitetônico e ao solo de modo que ela pudesse ser



29



30

apropriada pela comunidade, que a utilizaria como bem entendesse. Para a execução deste projeto, o grupo baseou-se na produção tradicional de redes para pesca, que consiste em uma produção manual passada de geração para geração.³³

Conhecido popularmente como “nó de rede” ou “nó de tecelão”, esta técnica necessita apenas de uma agulha de rede e cordas, mas é capaz de gerar um malha com grandes dimensões e estabilidade seguindo alguns simples passos que devem ser repetidos até que se conclua a extensão necessária. O resultado, no entanto, produz sempre o mesmo padrão quadriculado.



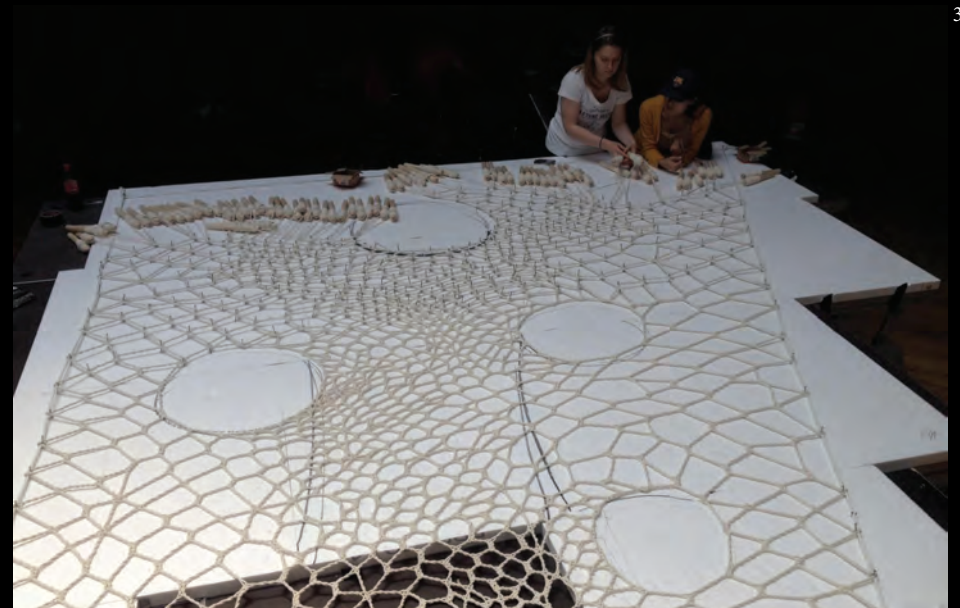
4.2 Communal XL Lace Hammock

Em 2014, a AA Visiting School desenvolveu uma oficina de três semanas no pequeno vilarejo de Vitanje na Eslovênia. As atividades ocorreram no então novo edifício do Centro Cultural de Tecnologia Espacial Europeia, chamado de KSEVT e exploraram o potencial do nano turismo da região com foco nas características naturais da paisagem e no comportamento exótico dos moradores locais.³⁴



32

Um dos grupos desta oficina notou que os visitantes do Centro Cultural deixavam a cidade logo após verem as exposições. Como resultado, eles propuseram um serviço com atividades e estratégias de acomodação que incentivassem as pessoas a permanecerem no vilarejo desde poucas horas a até mesmo vários dias. O projeto consistia em oferecer o aluguel de um kit que incluiria uma rede extra grande feita



33

de renda, um mapa com sugestões de lugares para explorar e um aplicativo de celular que permitiria atualizações de novas atrações disponíveis.

O processo de concepção e prototipagem desta rede traz uma releitura do processo tradicional da renda de bilros, uma técnica manual de produção de tecido que permite desenvolver padrões complexos de desenho com equipamentos rudimentares. A fabricação tradicional consiste em cruzamentos sucessivos de fios têxteis utilizando hastes de madeira (bilros) para manuseá-los, alfinetes para fixá-los e uma almofada de apoio. Em contrapartida, para o protótipo final os participantes utilizaram cordas, bastões de madeira, vários pregos e algumas bases de isopor.³⁴



34



35

5 Proposta

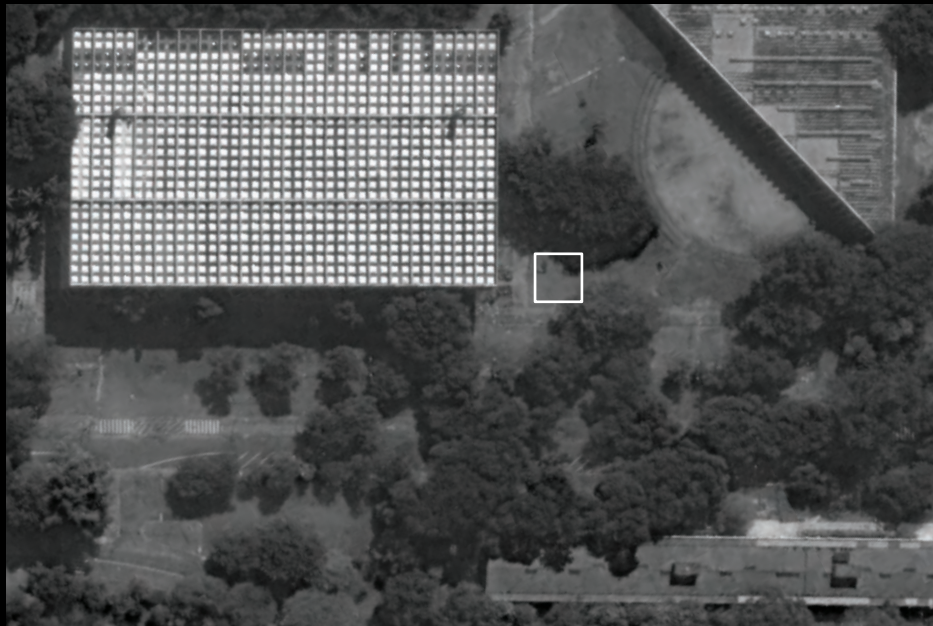
Estruturas da natureza que parecem relativamente simples como as teias de aranha, colmeias de abelha e cupinzeiros são determinadas principalmente pelo DNA do animal que o constrói, ou seja, seu programa genético. No entanto, mesmo nestes casos em que há uma identidade formal claramente definida, ainda são necessárias adaptações específicas para o ambiente imediato em que ela está sendo instalada: cada teia de aranha é ancorada de uma forma ligeiramente diferente uma da outra, por exemplo.³⁵

A arquitetura algorítmica funciona de maneira similar e também explora estes mecanismos naturais, mas em vez de partir de um programa genético, o projeto é determinado pelo algoritmo. Em resumo, o algoritmo possui todas as informações necessárias para a execução de uma obra.

Conforme os estudo de caso de algoritmos avançaram, o conceito do pavilhão começou a se estabelecer. A ideia de aprofundar as explorações de malhas e otimizar sua estrutura utilizando a combinação entre o simulador de física Kangaroo Physics e o algoritmo evolutivo Galapagos apresentaram um potencial interessante em direção à biomimética e ao *form finding*.

Durante o desenvolvimento dos capítulos anteriores, muitas informações fragmentadas foram sendo absorvidas em paralelo e de forma não linear, porém em uma das diversas reflexões sobre o que seria conveniente e confortável ao propor um pavilhão, chegou-se à conclusão de que as típicas redes indígenas seriam um bom ponto de partida.

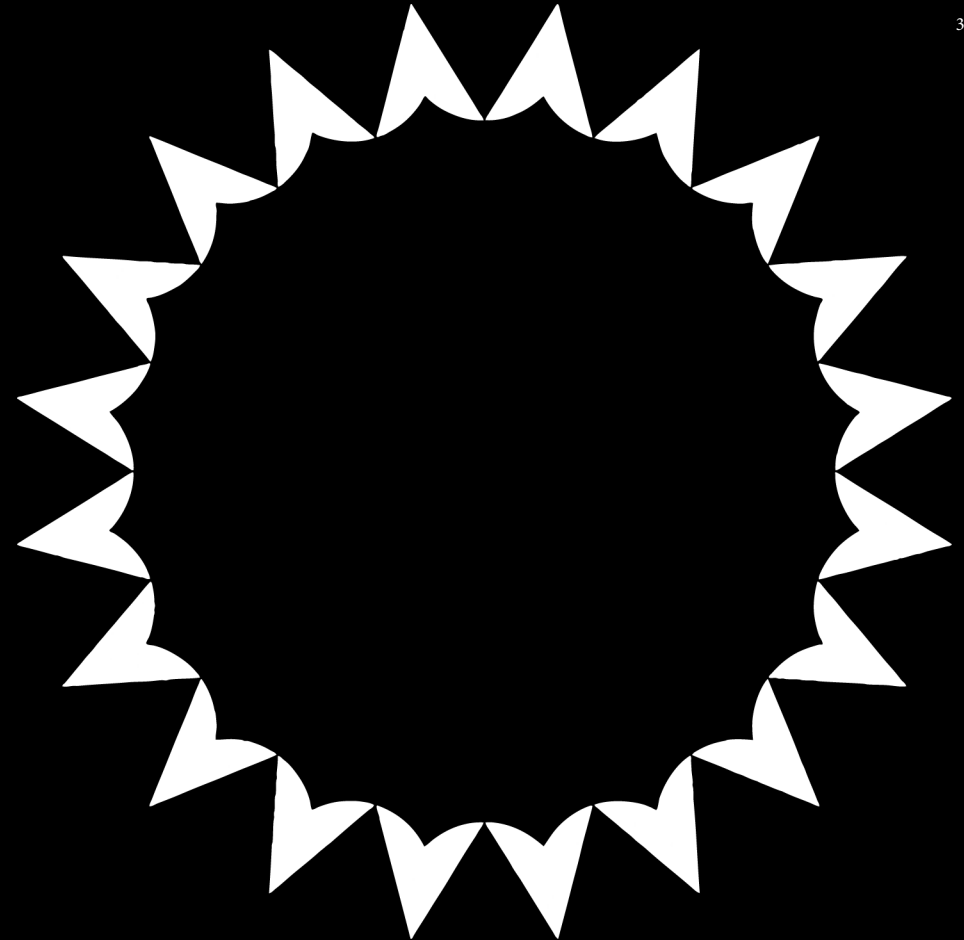
5.1 Local



5.2 Definição do conceito

A ideia de subverter a maneira como as redes de descanso são construídas apresenta um grande potencial no campo do *form finding* e foi conveniente e oportuno selecionar um dos estudos de caso e aperfeiçoá-lo nesta direção. Deste modo, o produto final apresentará uma base sólida de referências, atenderá as diretrizes de conforto, fabricabilidade e respeito ao patrimônio histórico, além de também propiciar um avanço nas possibilidades do design computacional.

Além disso, outra diretriz que o pavilhão buscou foi uma referência clara com a Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da USP, afinal, a FAU é frequentemente citada como uma faculdade com pensamento predominantemente modernista e seria interessante associá-la a uma forma alternativa de pensamento. Por tanto, foi proposto que seu próprio logo tivesse relação com o pavilhão.



A escolha de um pavilhão que se apropriasse de uma produção têxtil acabou se mostrando muito conveniente, já que uma das primeiras máquinas que passou a armazenar dados em forma de informação, foi justamente a máquina de tecer com cartão perfurado de Joseph-Marie Jacquard, em 1804.³⁶ Isso significa que por mais complicado que o pavilhão aparente ser, ele ainda assim será um algoritmo e estará suscetível a passar por um processo de automatização e consequente produção customizada em larga escala.



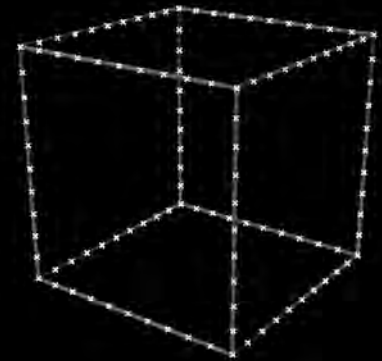
5.3 Técnica

A solução que mais se aproximou do conceito que se pretende alcançar foi a utilizada no estudo de caso da instalação artística de Tomás Saraceno. Seu projeto *Galaxies forming along filaments* permitiu uma deformação livre de um padrão pré-determinado, muito interessante para estudo de *form finding*.

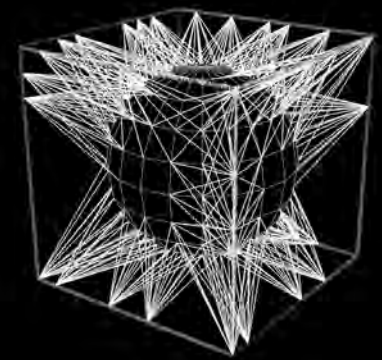
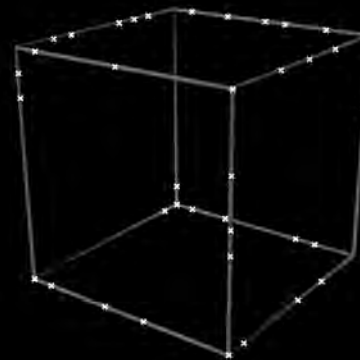
A seguir serão apresentados estudos de diversos padrões produzidos no Grasshopper com o auxílio do *plug-in* Kangaroo Physics a fim de gerar um efeito de trama têxtil que se aproxime da realidade. O toque final é dado pelo Galapagos, um algoritmo evolutivo integrado ao Grasshopper.

O Galapagos funciona de forma similar à teoria da evolução proposta por Charles Darwin, daí seu nome *Galapagos evolutionary solver*. Neste estudo, ele irá gerar no início 20 indivíduos aleatórios baseados no *pool* genético, que neste caso serão 116 vértices encontrados ao longo da estrutura cúbica e, para cada um destes vértices, existirão 16 possibilidades de conexão com a esfera.

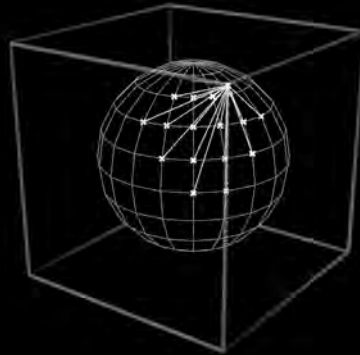
Tomemos como exemplo a imagem ao lado. Nela nota-se que cada haste da estrutura cúbica apresenta ao longo de seu comprimento 9 vértices únicos e mais dois nas pontas, que são comuns a duas outras hastes, ou seja, a estrutura totaliza 116 vértices.



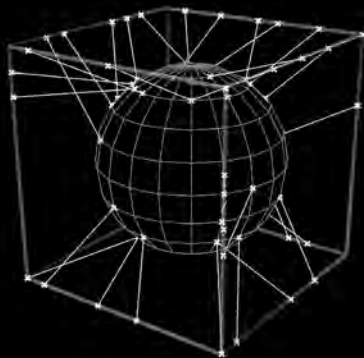
O primeiro passo do algoritmo é o de selecionar entre 0 e 40 destes vértices, para que então seja possível determinar os 16 vértices da esfera mais próximos de cada vértice da barra.



Por exemplo, para o vértice que aparece na imagem ao lado no canto superior da estrutura, são determinados os 16 vértices mais próximos na esfera. O próximo passo do algoritmo é o de selecionar um vértice dentre estes 16 para criar uma única linha.

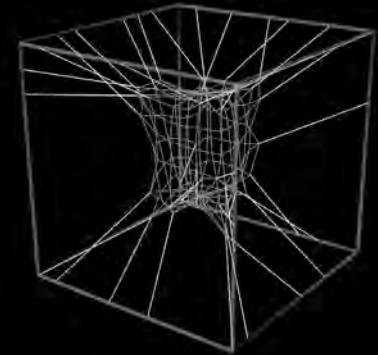


Este processo se repete em paralelo para todos os vértices selecionados de maneira que exista apenas uma única linha saindo de cada vértice e conectando-o à esfera.

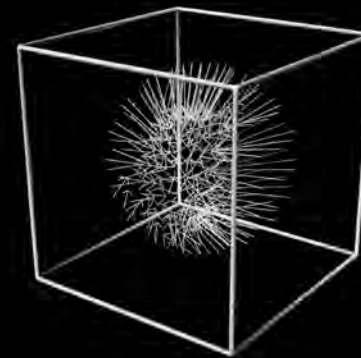


Em seguida, as linhas e a malha da esfera serão convertidas em cabos sujeitos à lei de Hooke, ou seja, a lei de elasticidade dos corpos. Com a resistência dos cabos e da malha bem ajustados é possível fazer com que o sistema entre em equilíbrio.

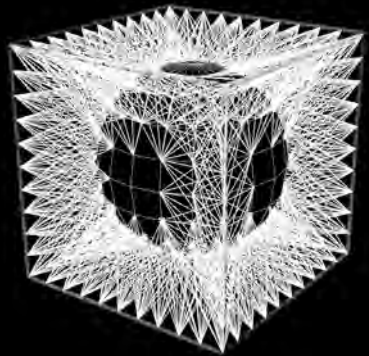
Com a estrutura preparada, pode-se então ativar a física usando o Kangaroo. A partir disso, é calculada a distância entre os vértices originais da esfera estática e os vértices com a esfera “relaxada”. O Galapagos poderá com isso buscar dentre os 20 indivíduos iniciais, os 5 mais “adaptados”. Esse processo é chamado de função *fitness*, que neste caso seleciona os resultados mais próximos ao formato de uma esfera.



A partir da seleção inicial, os resultados mais satisfatório tem suas informações do *pool* genético recombinadas de maneira a criar novos 20 indivíduos, ou seja, uma nova geração e isso se repete até que se atinja um resultado satisfatório.



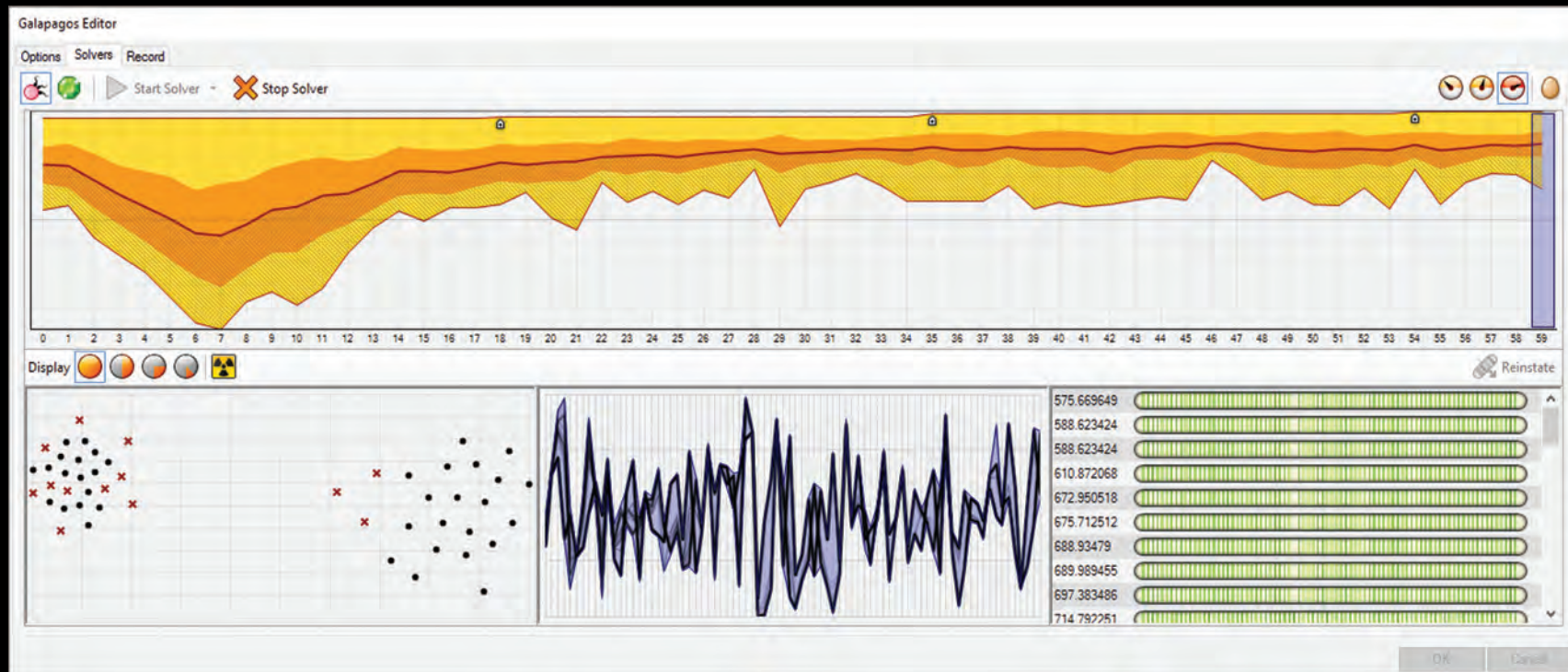
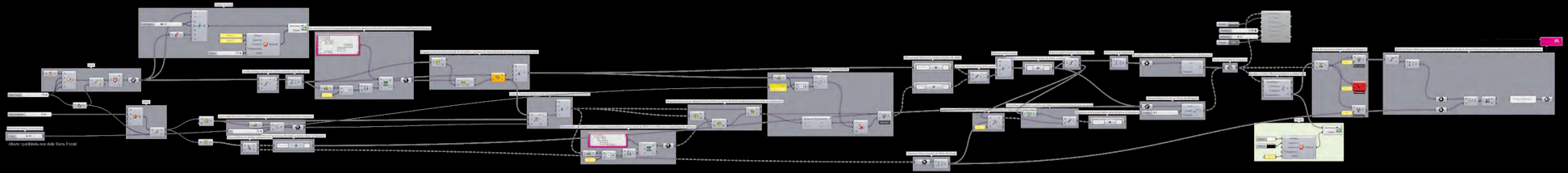
Para este estudo existem 1856 possibilidades de cabos e um número enorme de combinações possíveis entre eles, o que resultou em um ótimo estudo para entender como o computador pode ajudar no processo de design quando se dispõe de uma grande quantidade de dados.

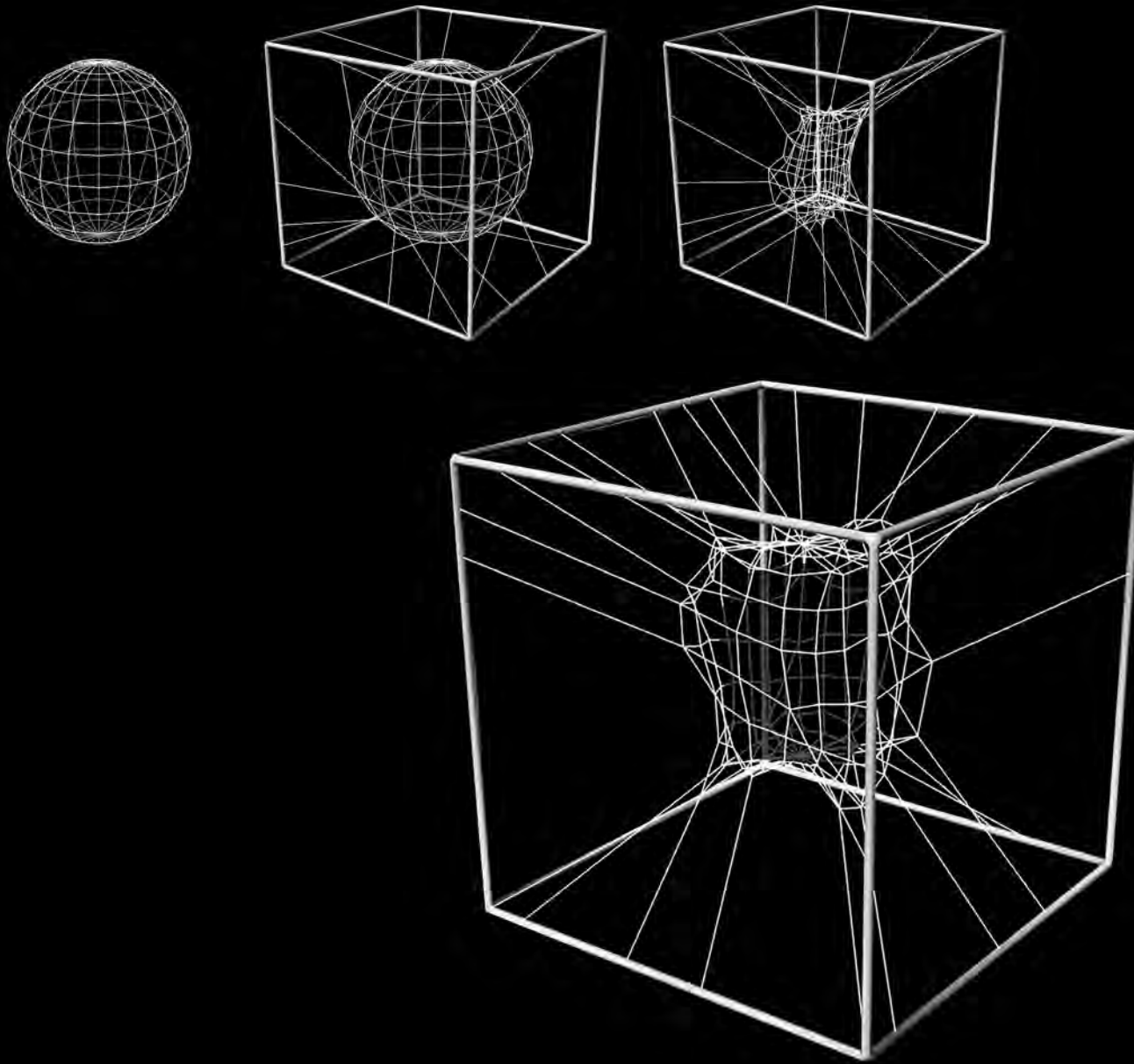


Este algoritmo teve que ser muito bem estudado antes do desenvolvimento deste trabalho, pois para conseguir chegar em um método consistente de evolução, a função *fitness* e o *pool* genético precisam estar muito bem alinhados.

ESTUDO 01

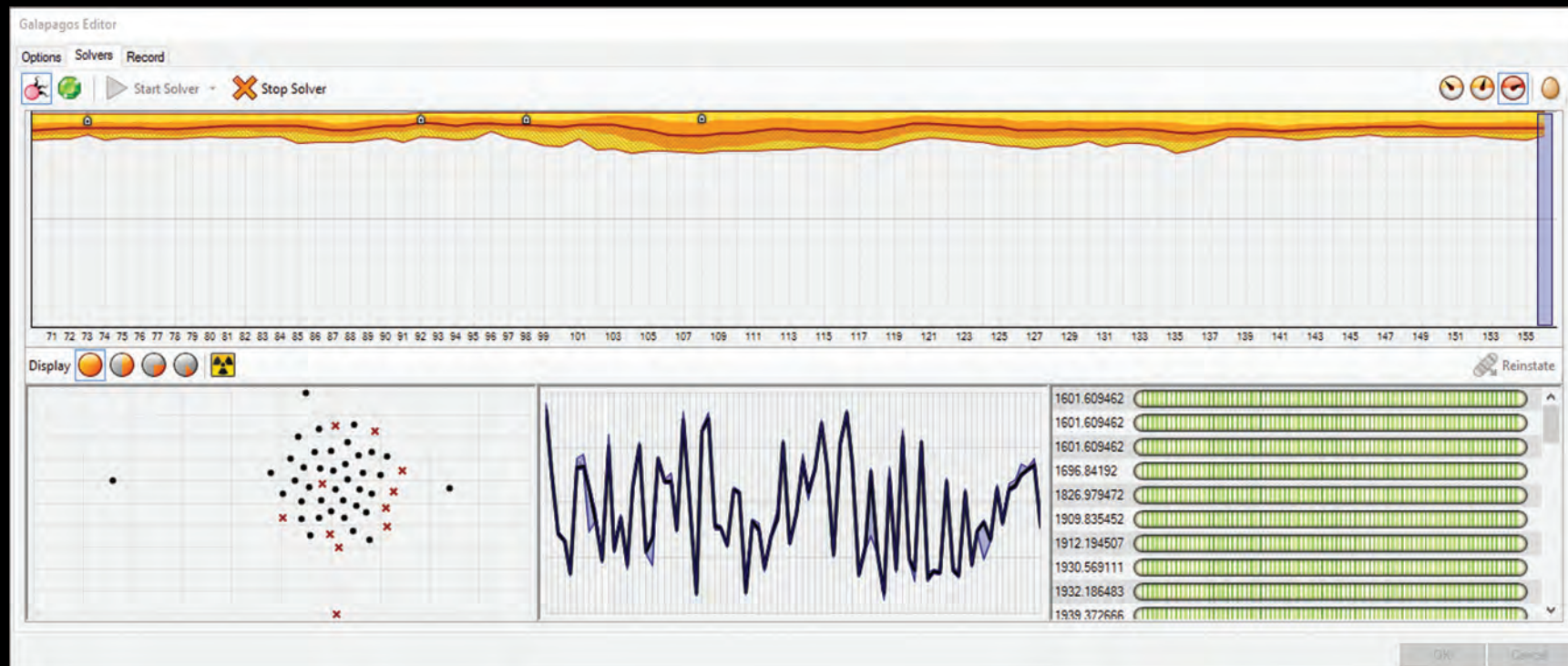
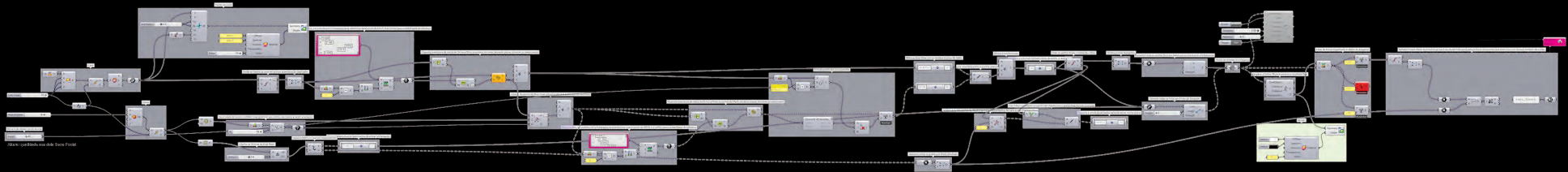
Malha quadriculada

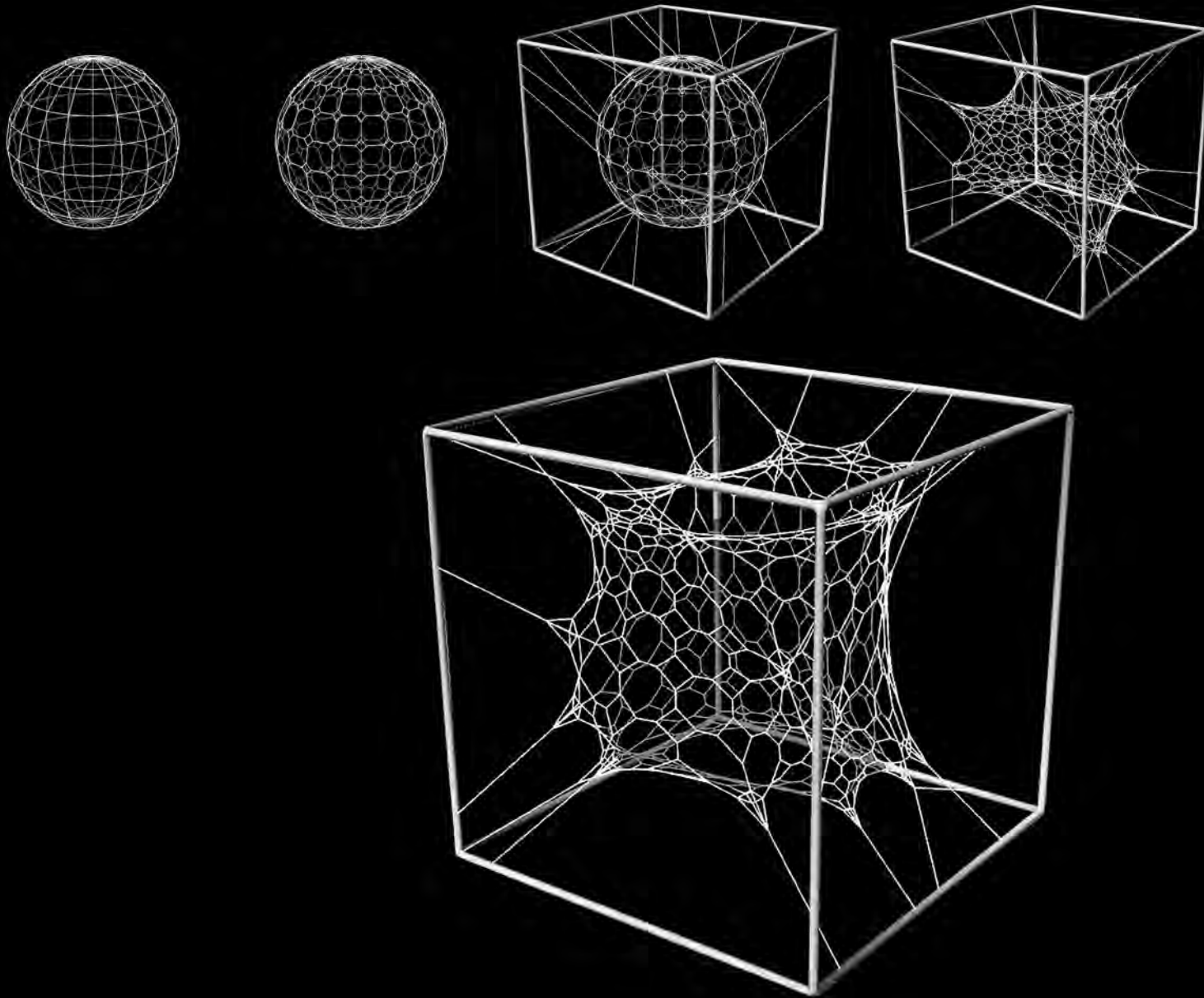




ESTUDO 02

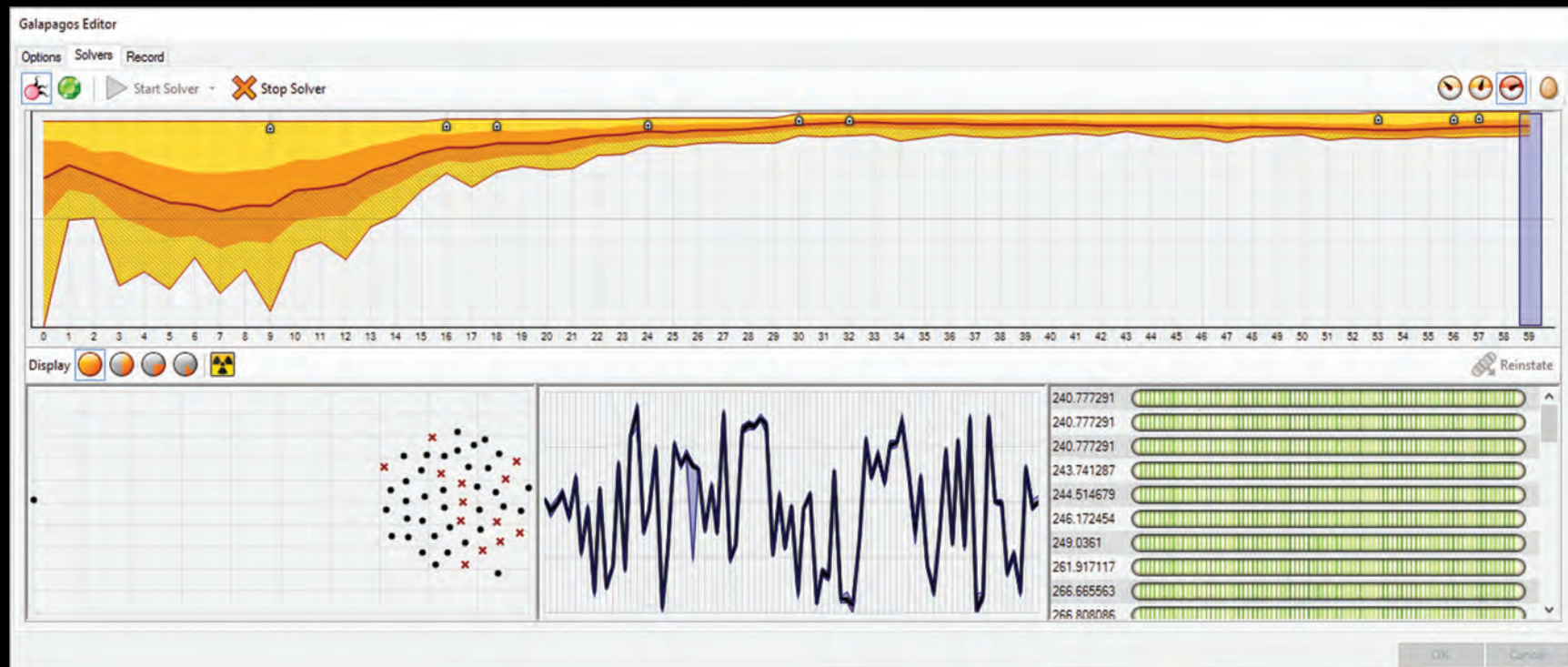
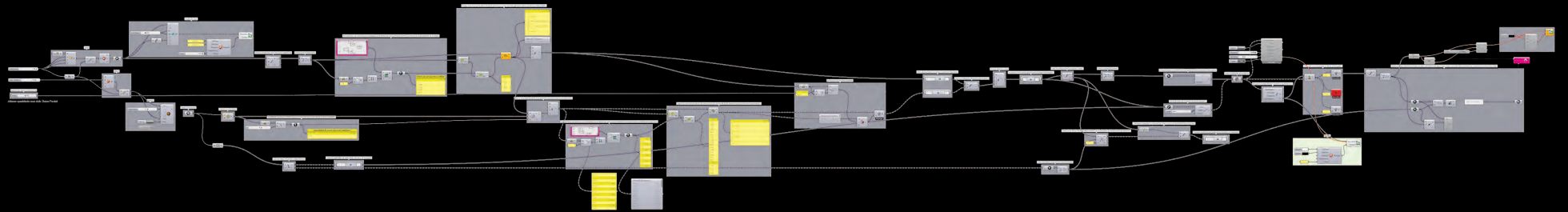
Malha quadriculada truncada

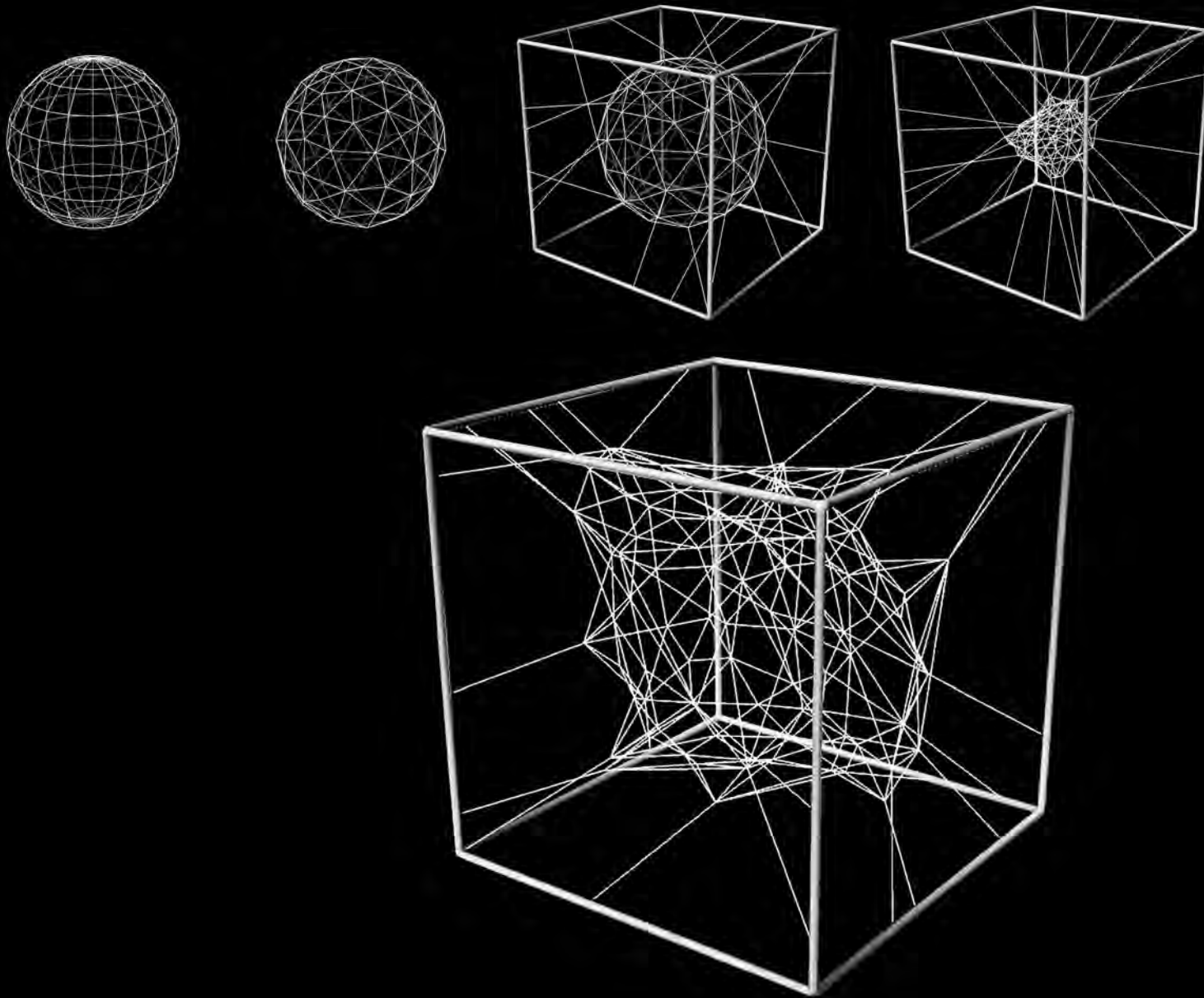




ESTUDO 03

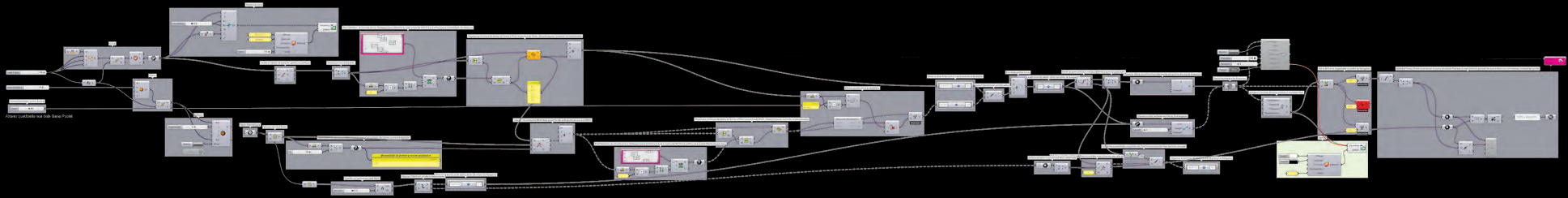
Malha triangular

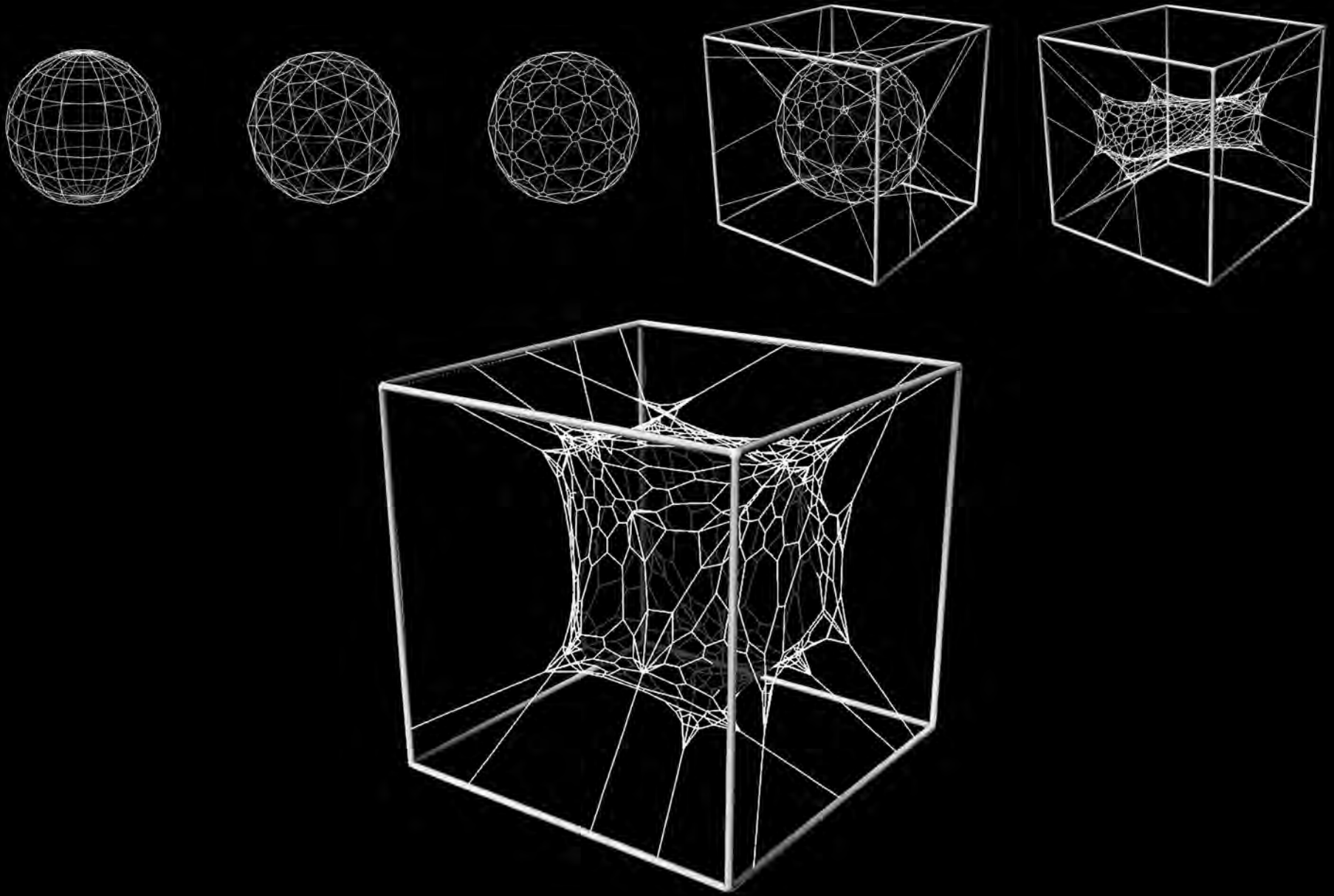




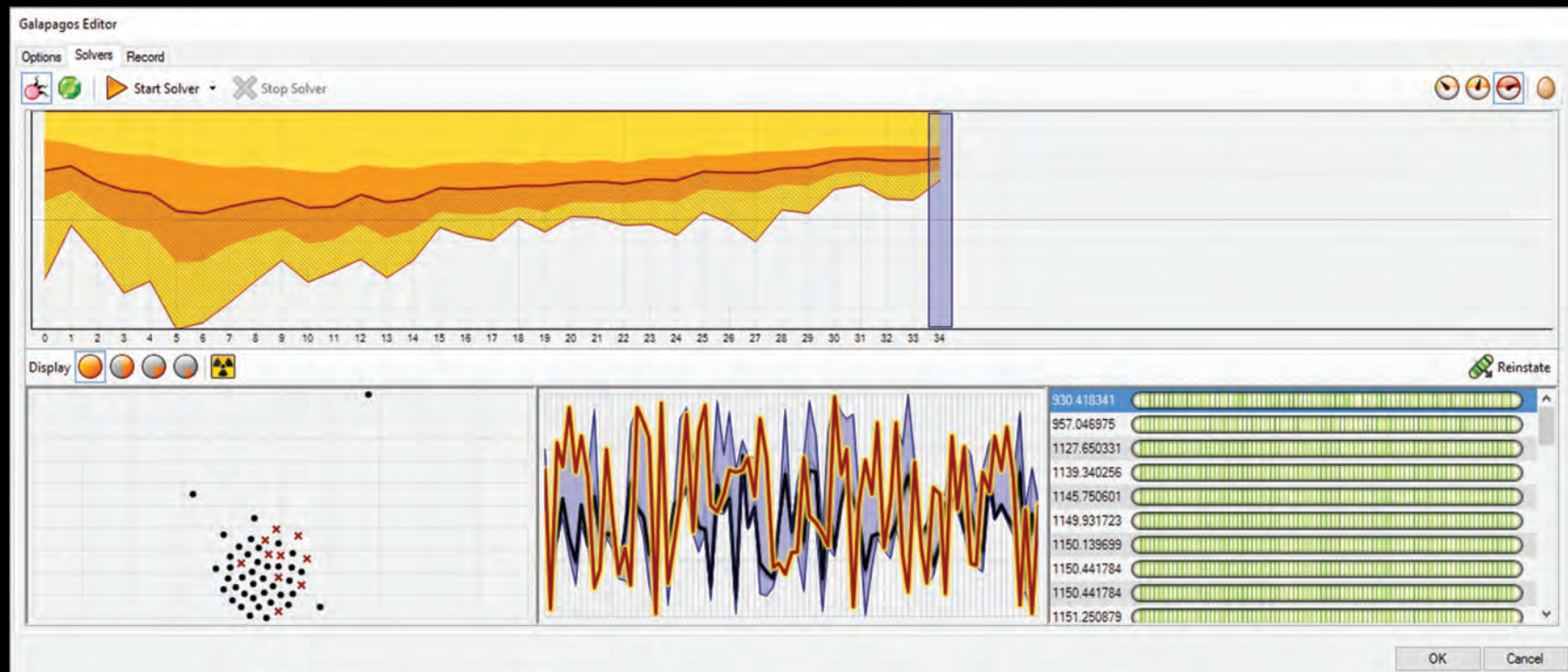
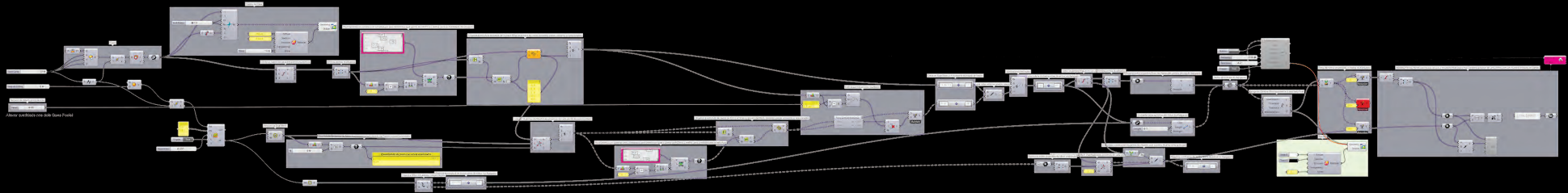
ESTUDO 04

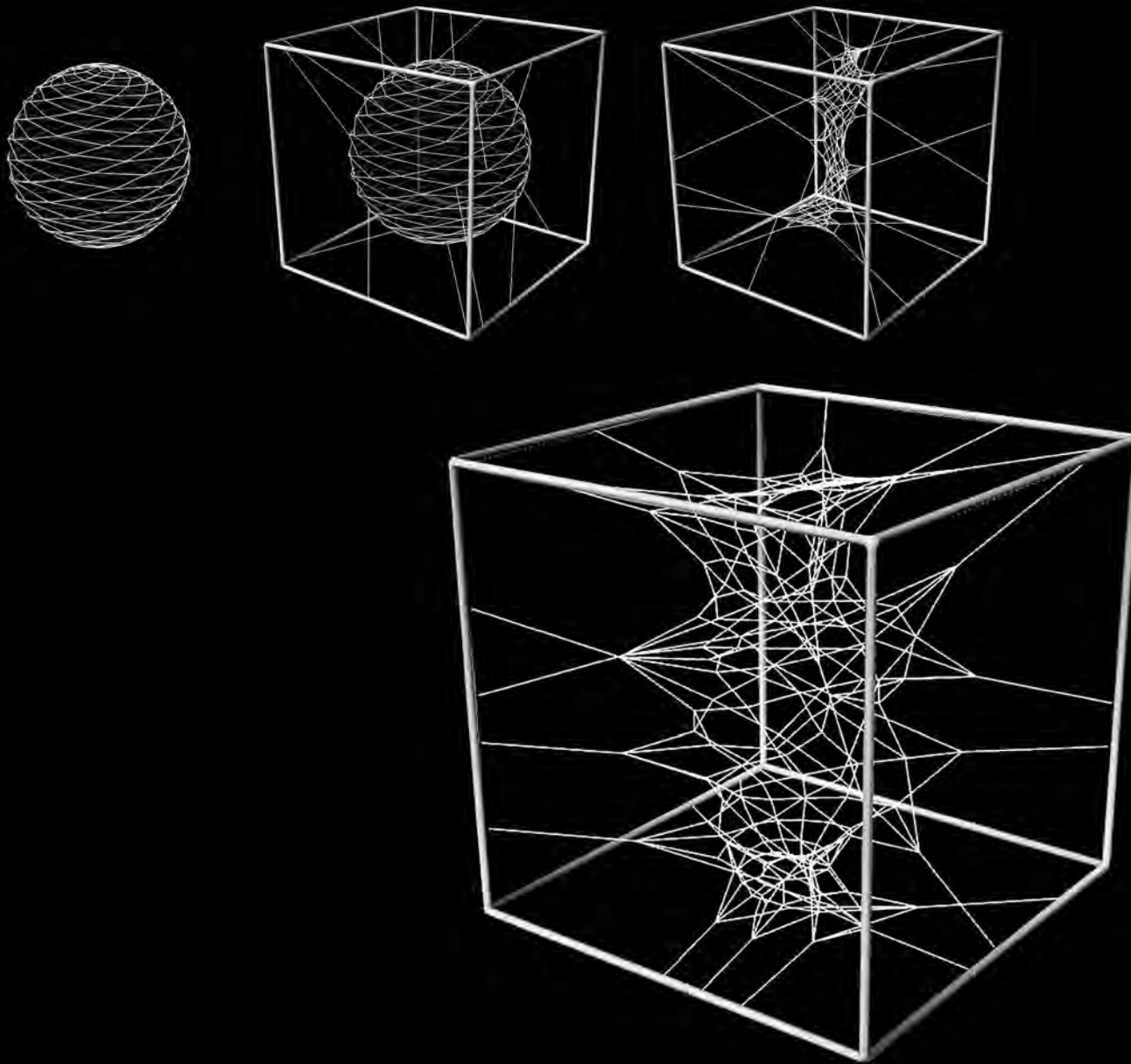
Malha triangular truncada





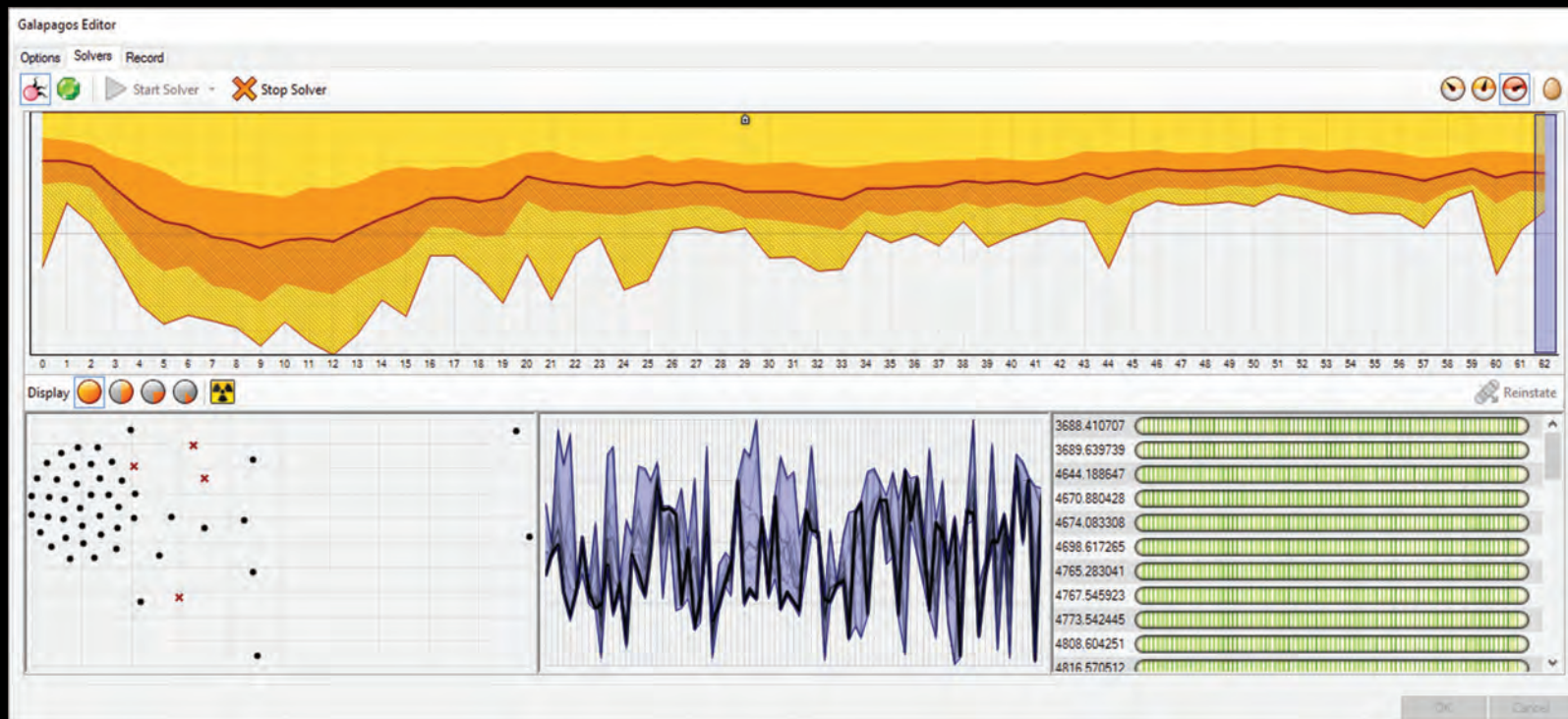
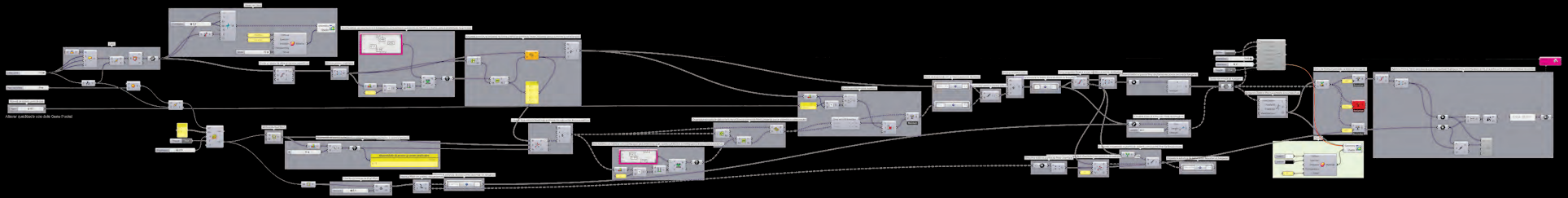
ESTUDO 05 Malha filotaxis

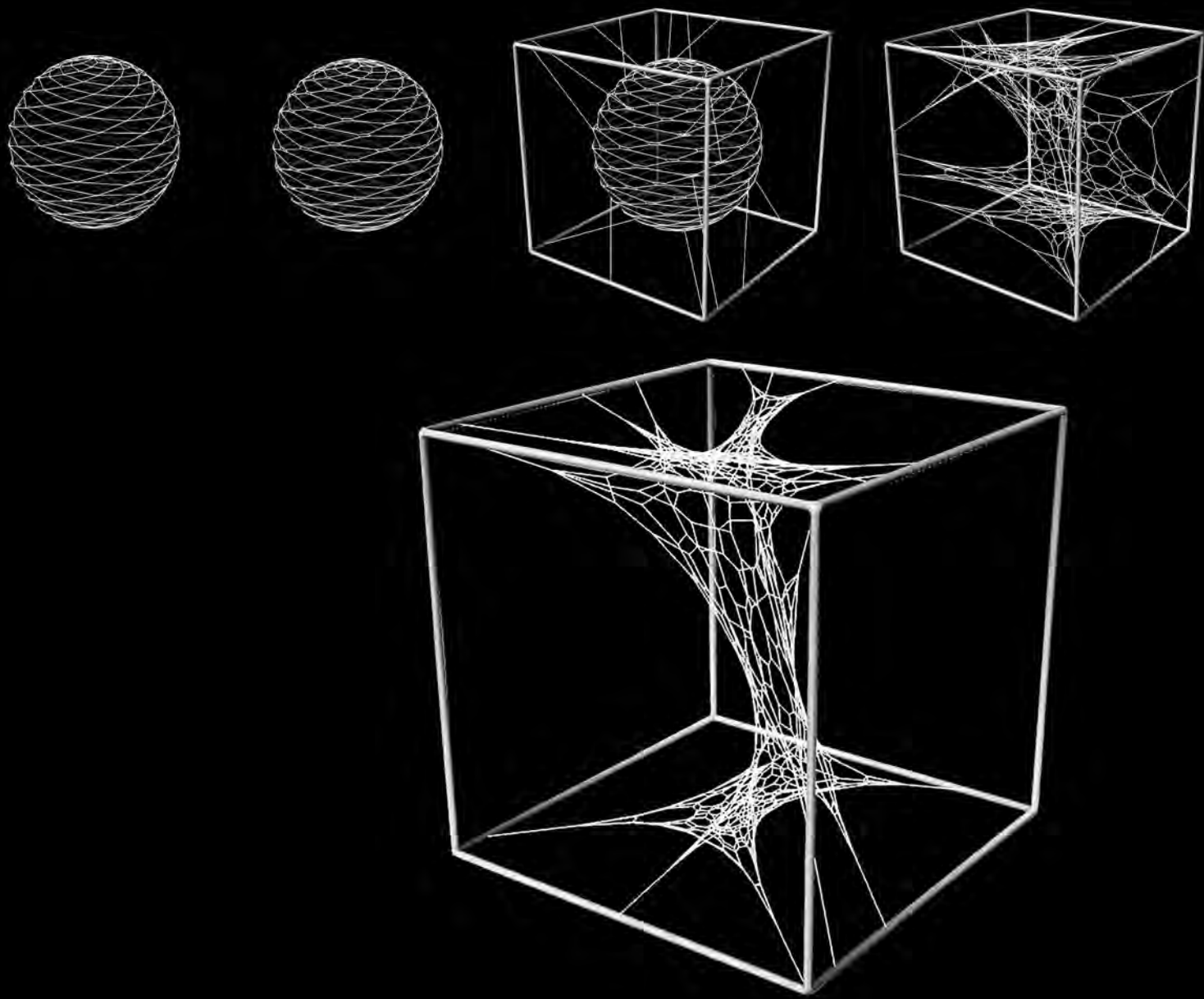




ESTUDO 06

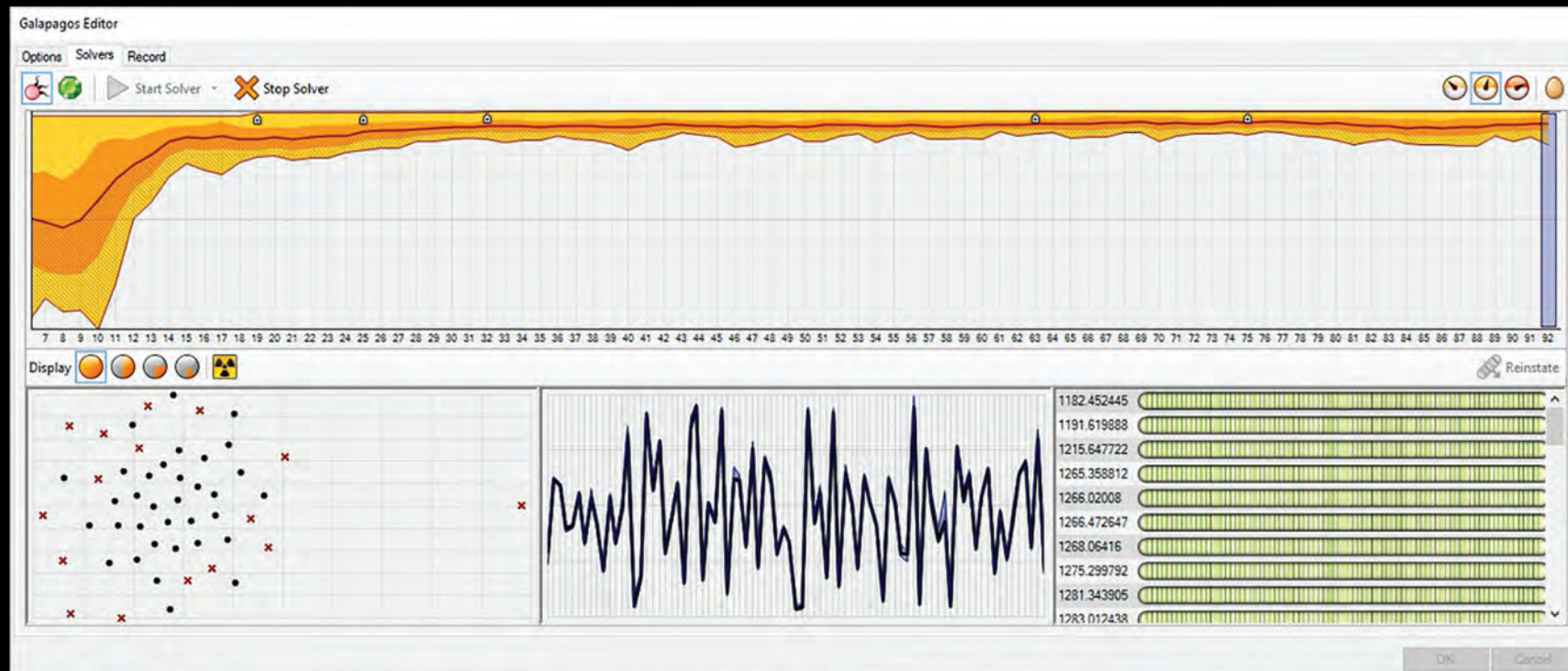
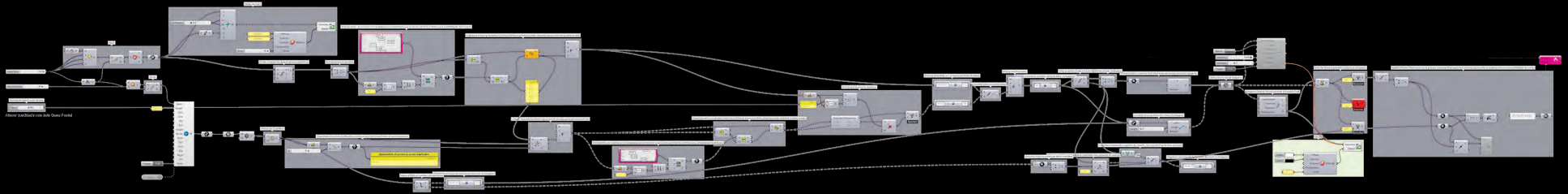
Malha filotaxis truncada

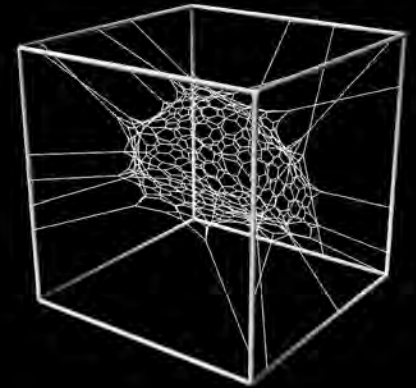
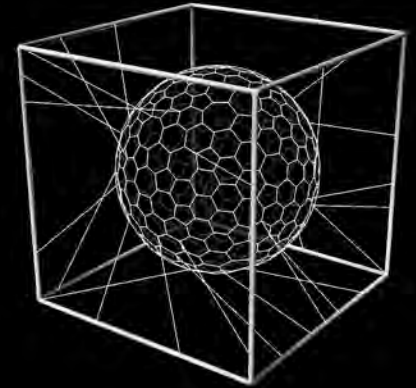
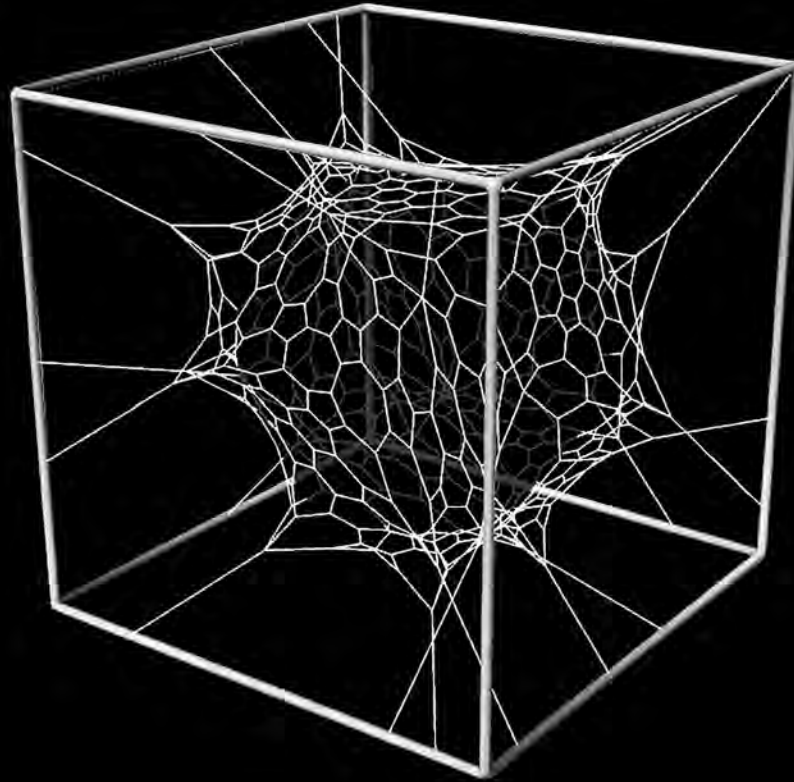
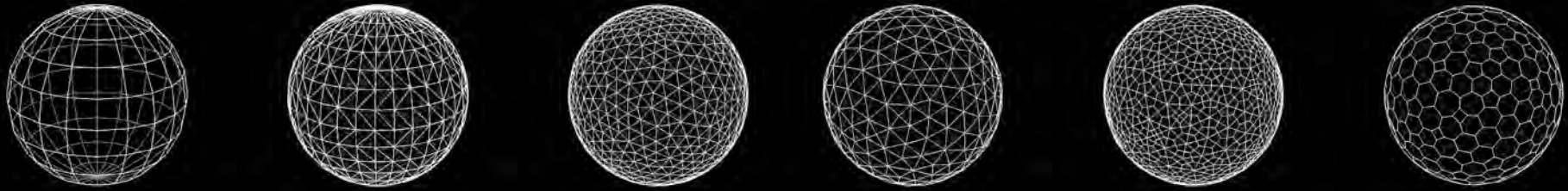




ESTUDO 07

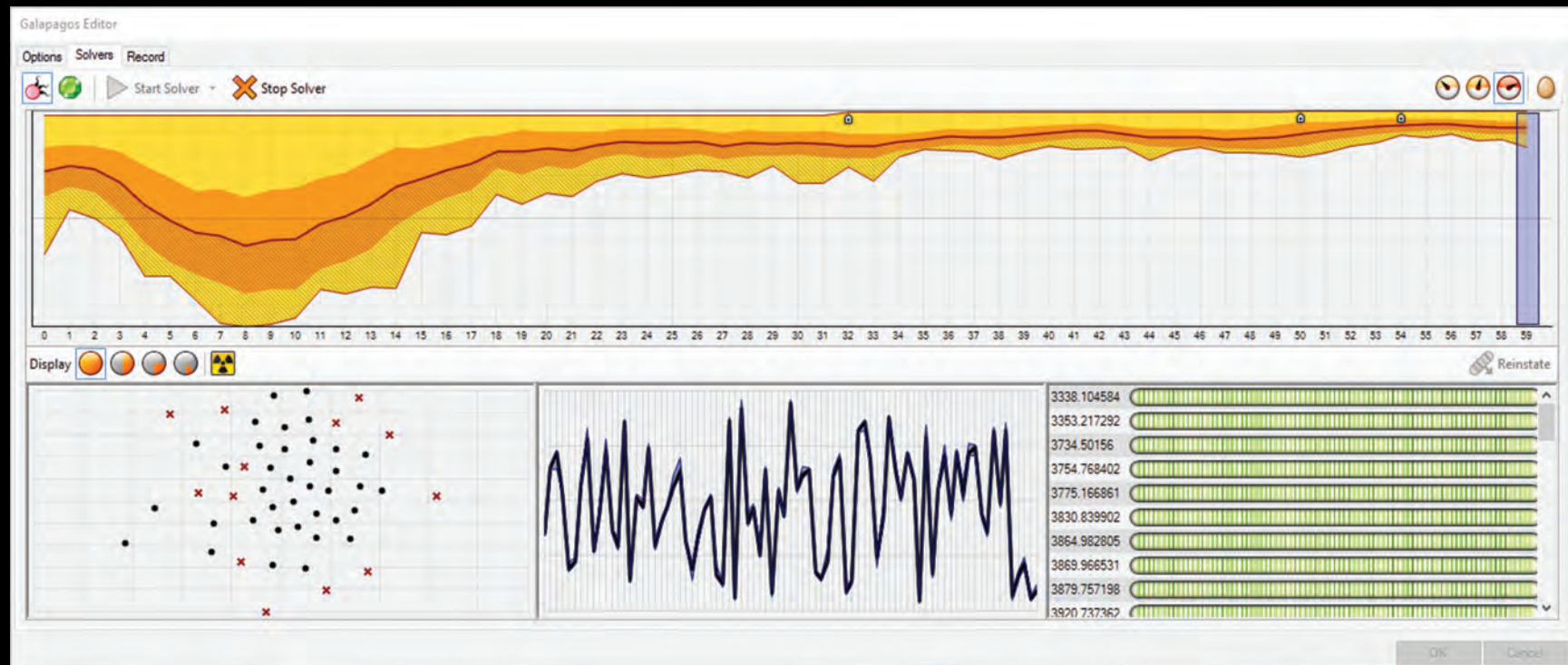
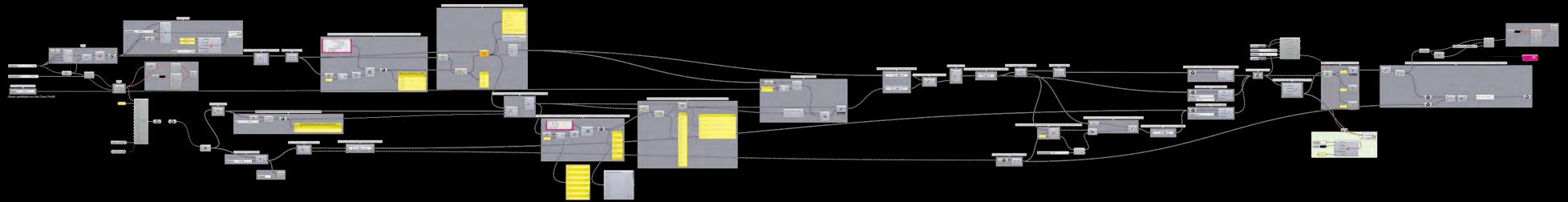
Malha dual hexagonal

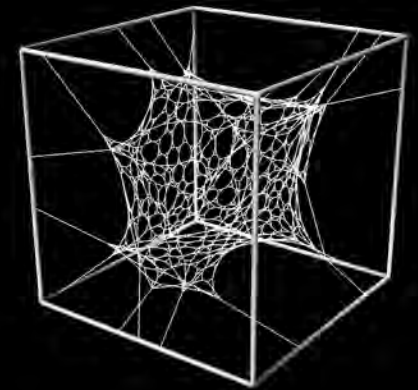
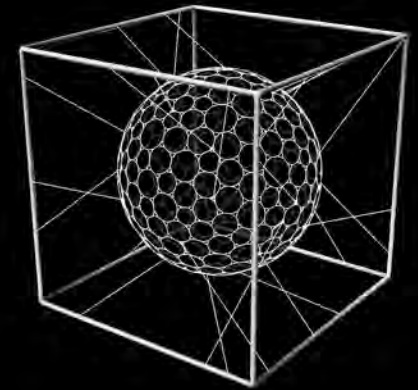
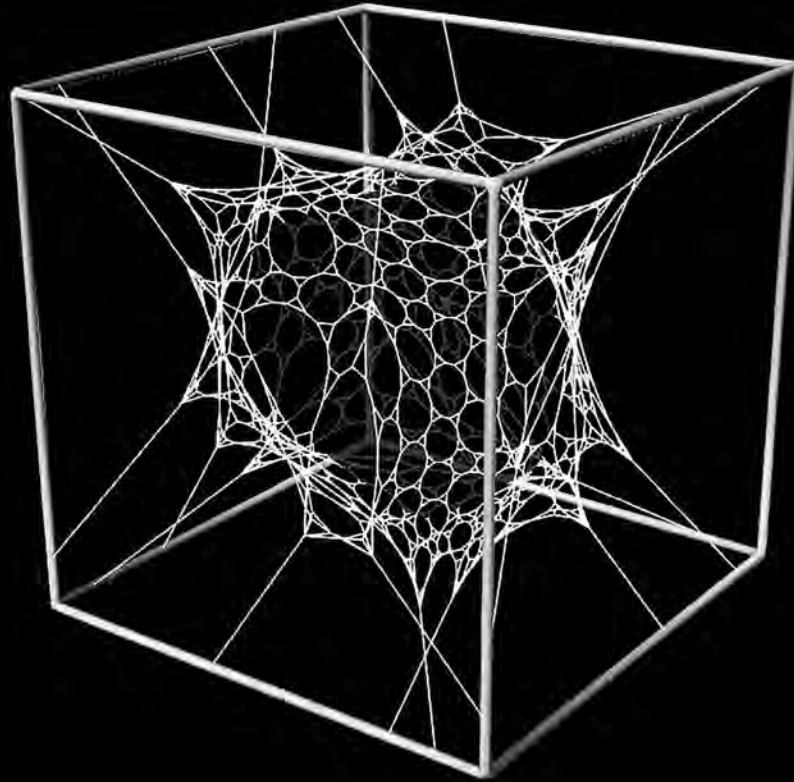
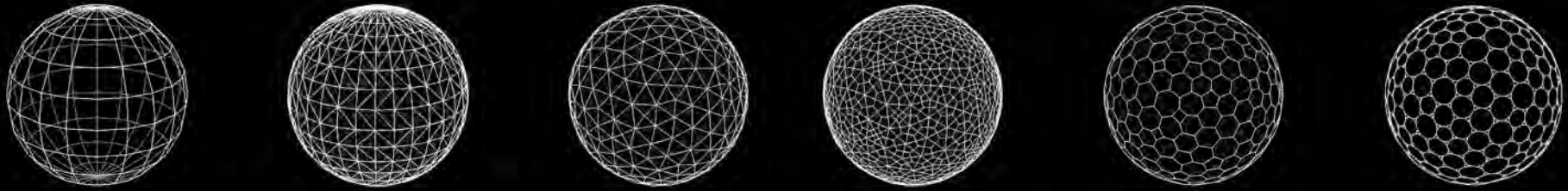




ESTUDO 08

Malha dual hexagonal truncada

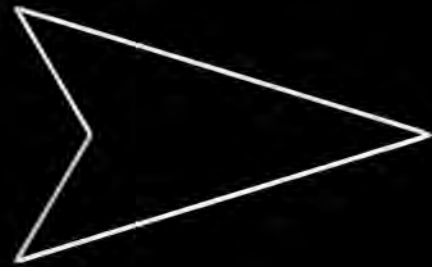
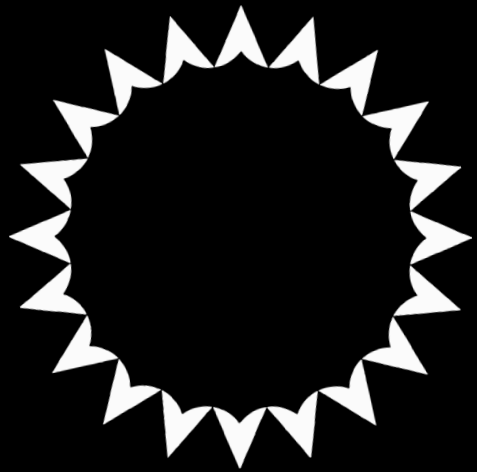




5.4 Desenvolvimento

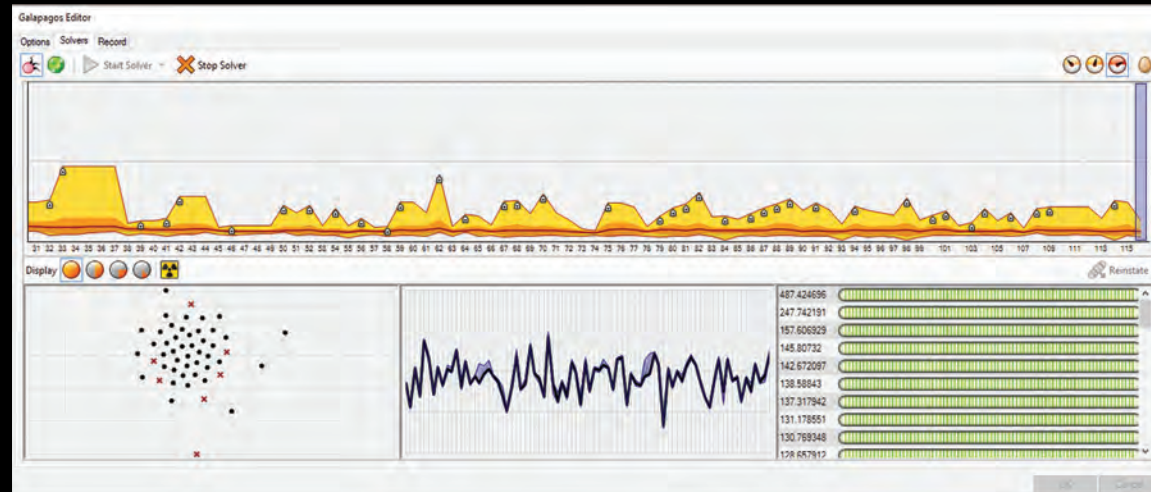
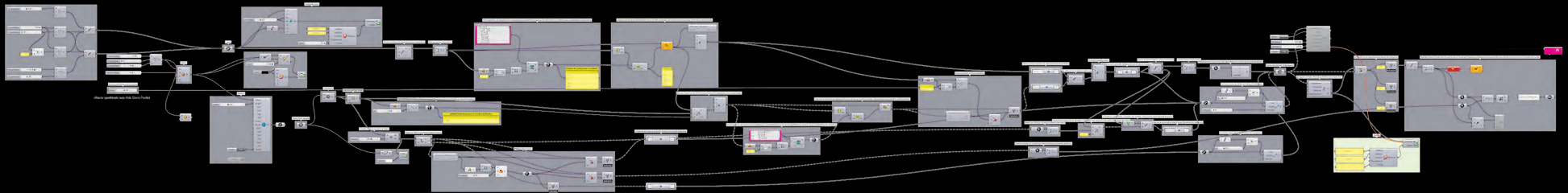
Com os resultados obtidos a partir da interação das malhas esféricas tensionadas presas à estrutura cúbica, concluiu-se que a melhor alternativa para desenvolver a metodologia de concepção seria a “Malha dual hexagonal truncada”, pois foi a que apresentou maior adequação aos requisitos de conforto, já que o resultado final se aproximou mais da esfera original, o que indica maior controle sobre a forma final, além de ser perfeitamente possível fabricá-la.

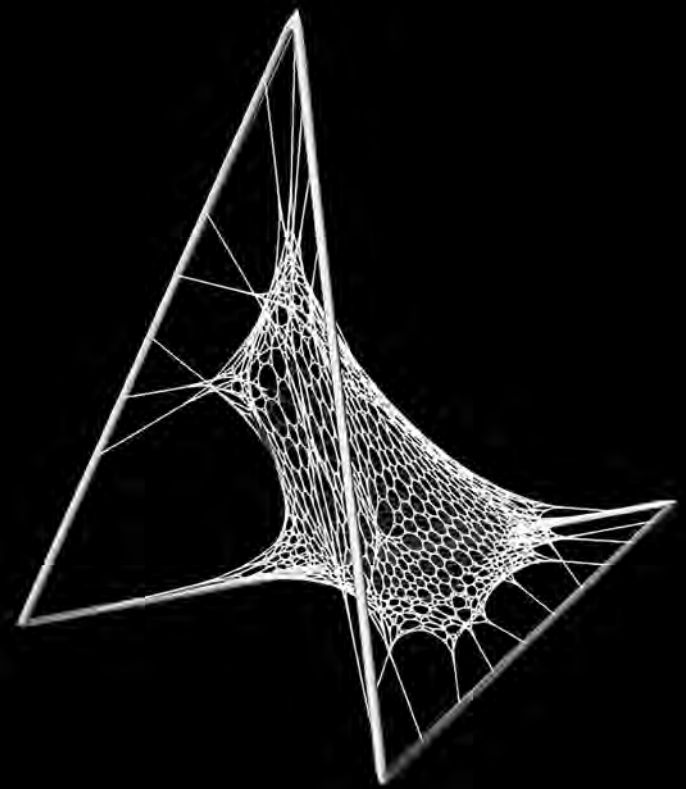
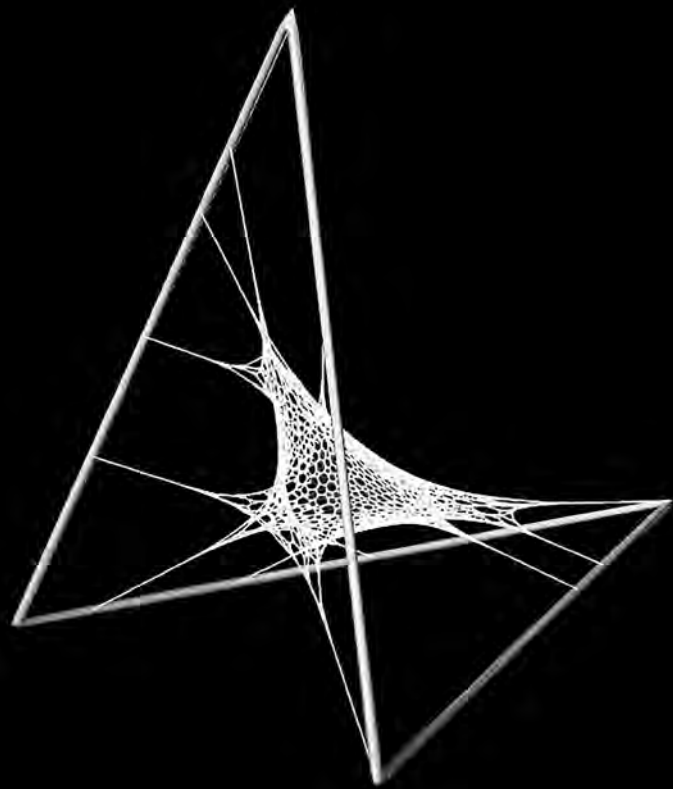
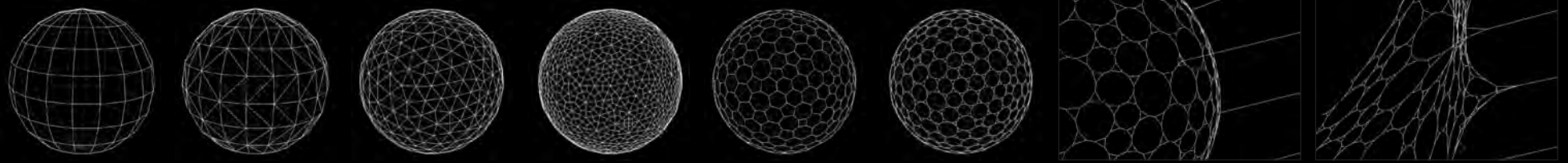
A estrutura foi desenvolvida de maneira que remetesse diretamente a um dos módulos que compõem o logotipo da FAU-USP. A partir deste esqueleto gerou-se um espectro amplo de soluções.



ESFERA

Malha dual hexagonal truncada + estrutura FAU-USP

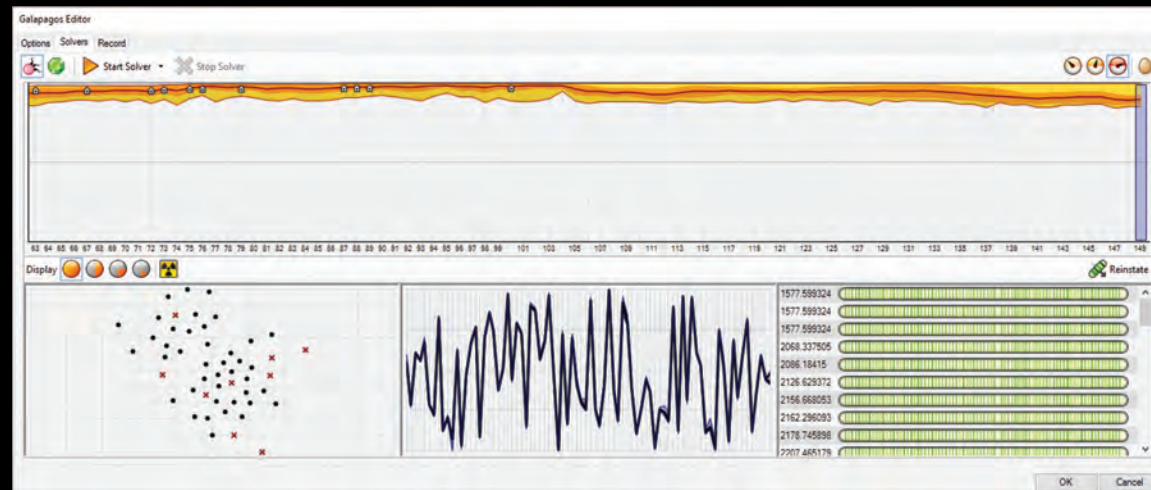
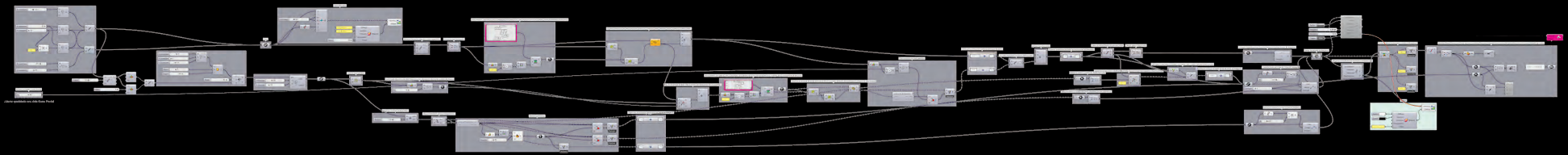


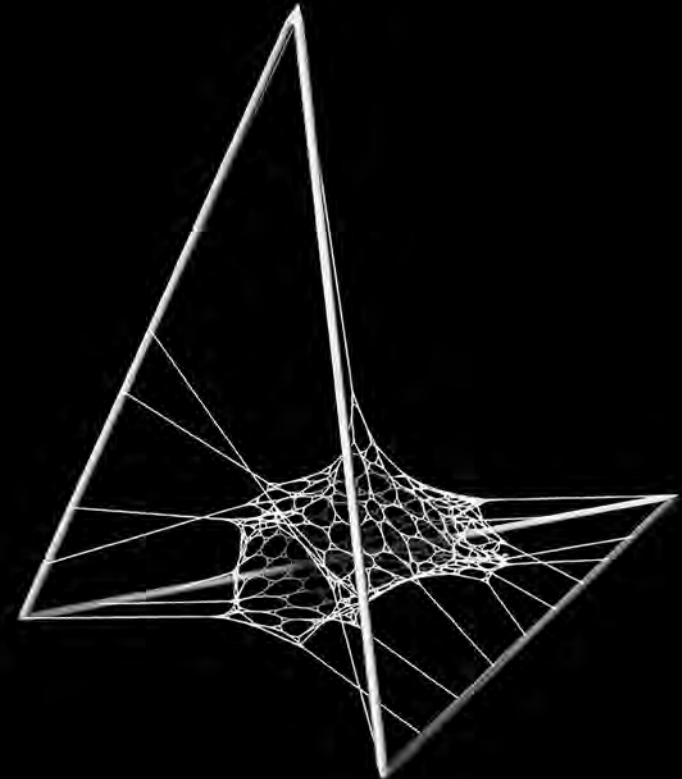
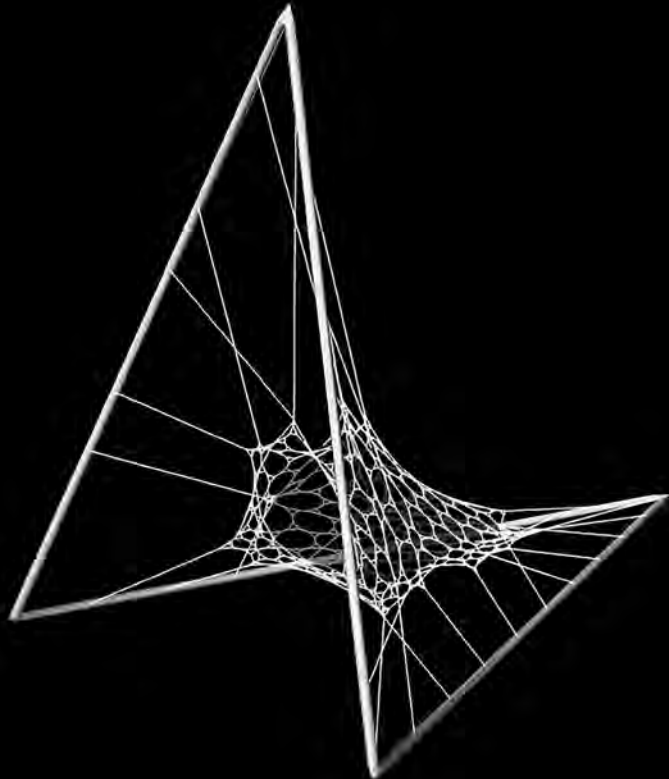
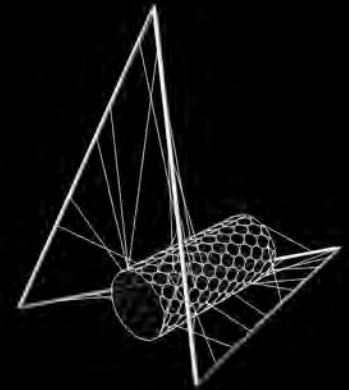
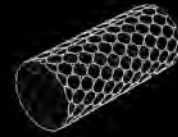
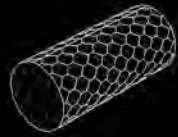


CILÍNDRRO

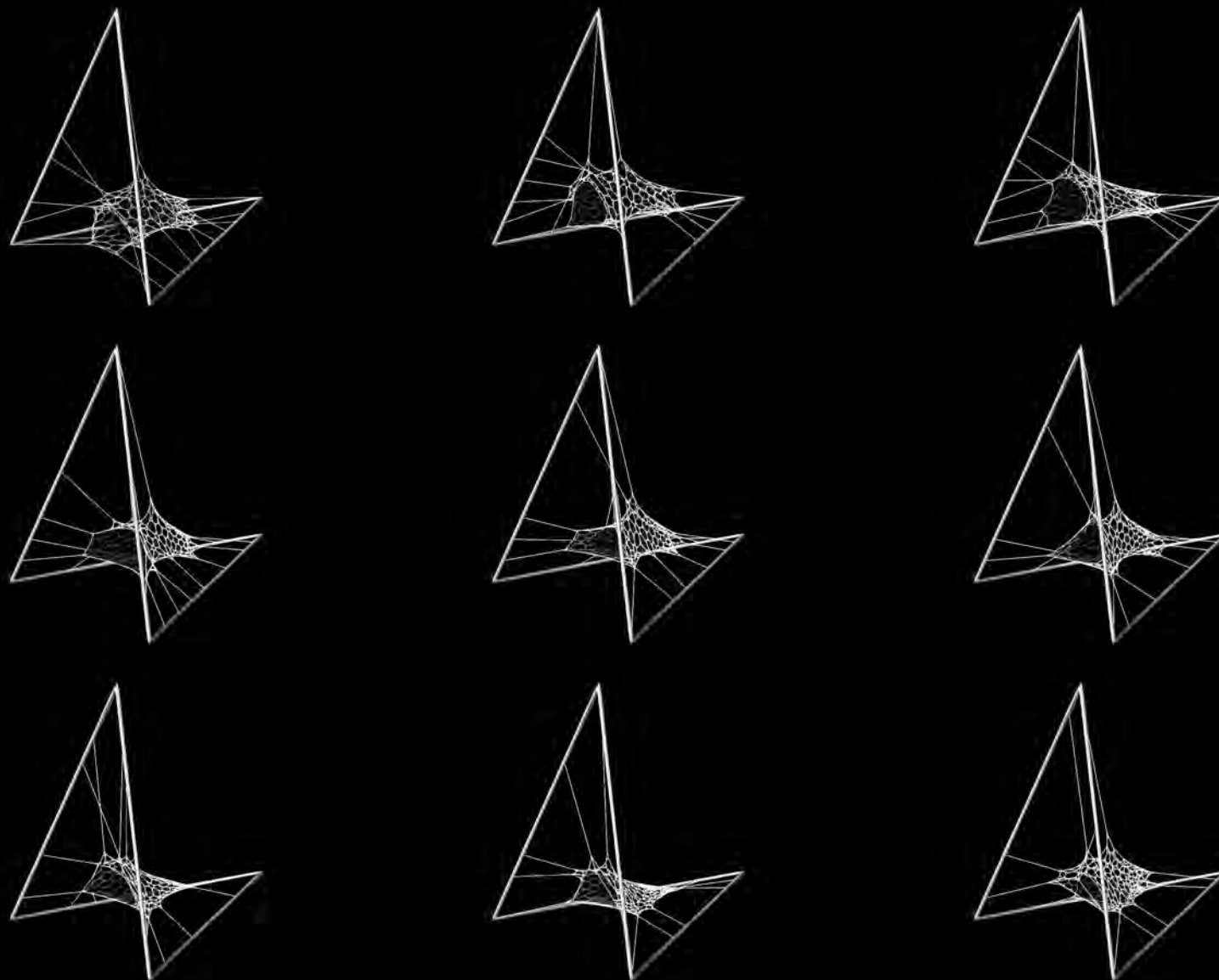
Malha dual hexagonal truncada + estrutura FAU-USP

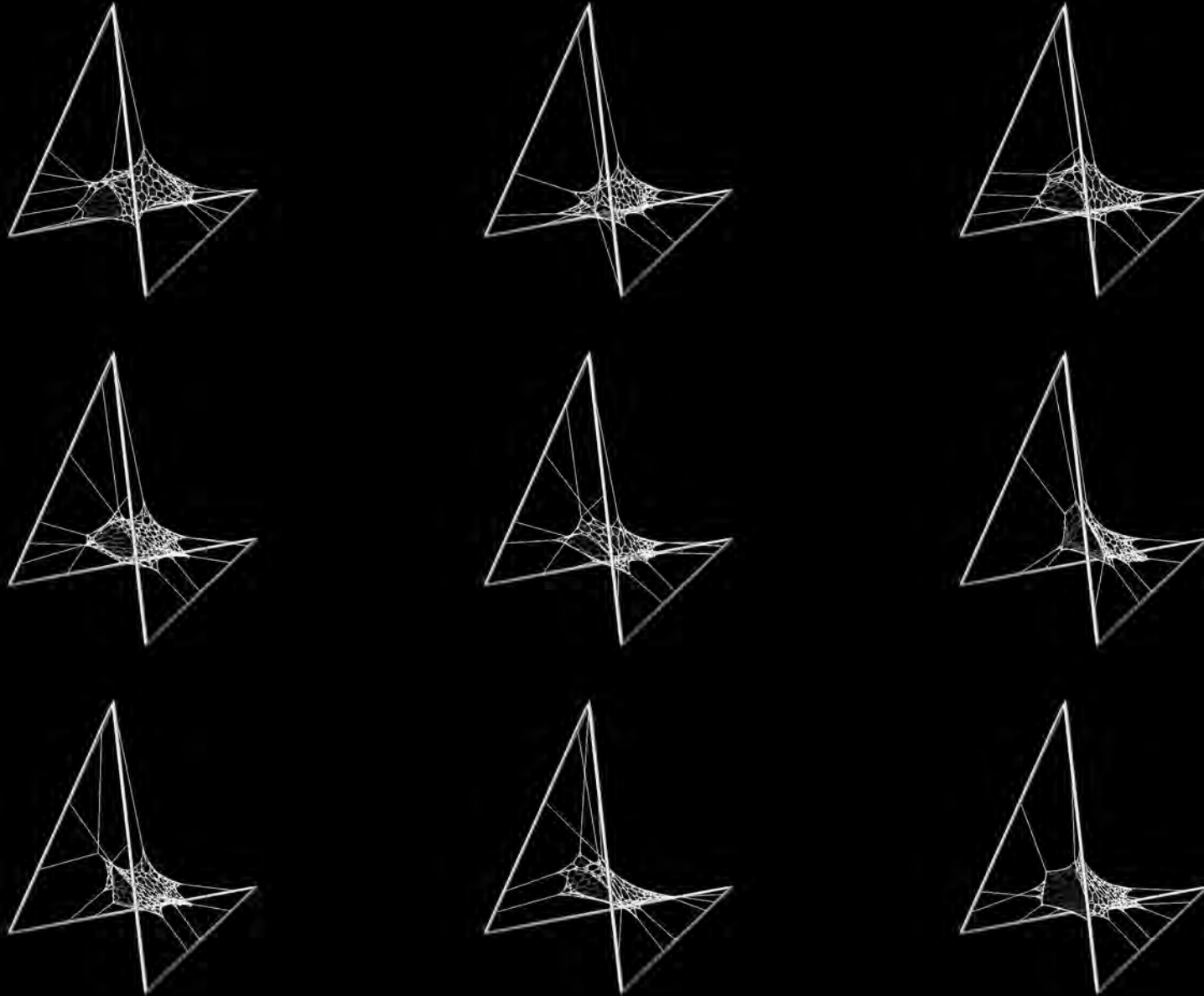
Este estudo final foi resultado do *feedback* do processo de produção do modelo físico apresentado no capítulo seguinte.





Espectro de possíveis soluções





6 Detalhamento

6.1 Método construtivo

A escolha do método de produção não poderia estar desconectado de todo o contexto até então apresentado. Assim, para se produzir a malha hexagonal proposta no capítulo anterior, foi utilizada a tradicional técnica de renda de bilro, a mesma utilizada pela AA Visiting School no estudo de caso de fabricação. Apesar de o desenvolvimento

da rede utilizado pela AA em sua *Communal XL Lace Hammock* ser basicamente artesanal, percebe-se que este é um processo linear passível de automação. Ou seja, ao analisar a sequência de movimentos geradora das formas da malha, verifica-se que é possível elaborar um equipamento que produza resultados similares de maneira mais eficiente.



Já existem, por exemplo, drones capazes de carregar carretéis com cordas para produzir tramas em pleno voo. Apesar do assunto não ser o foco deste trabalho, ele poderá ser aprofundado em um estudo futuro. Por enquanto, pode-se simplesmente produzir a rede manualmente.



A estrutura será composta por 4 tubos de aço de duas polegadas de diâmetro e 2,5 m de comprimento usando, para tanto, 4 conexões do tipo cotovelo pré-fabricadas com ângulos de 34 e 71,9 graus.



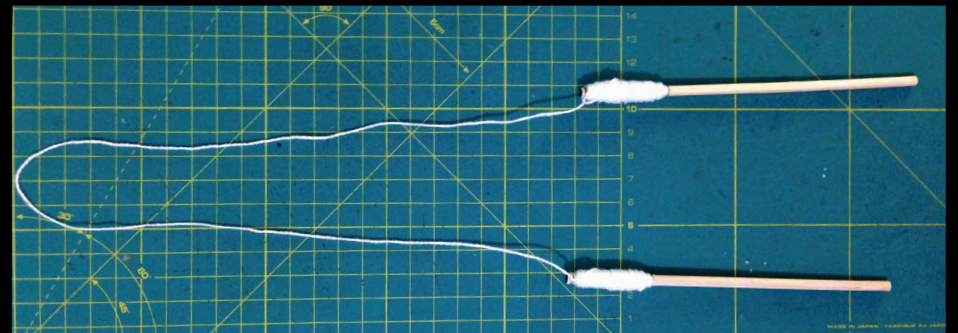
6.2 Transporte

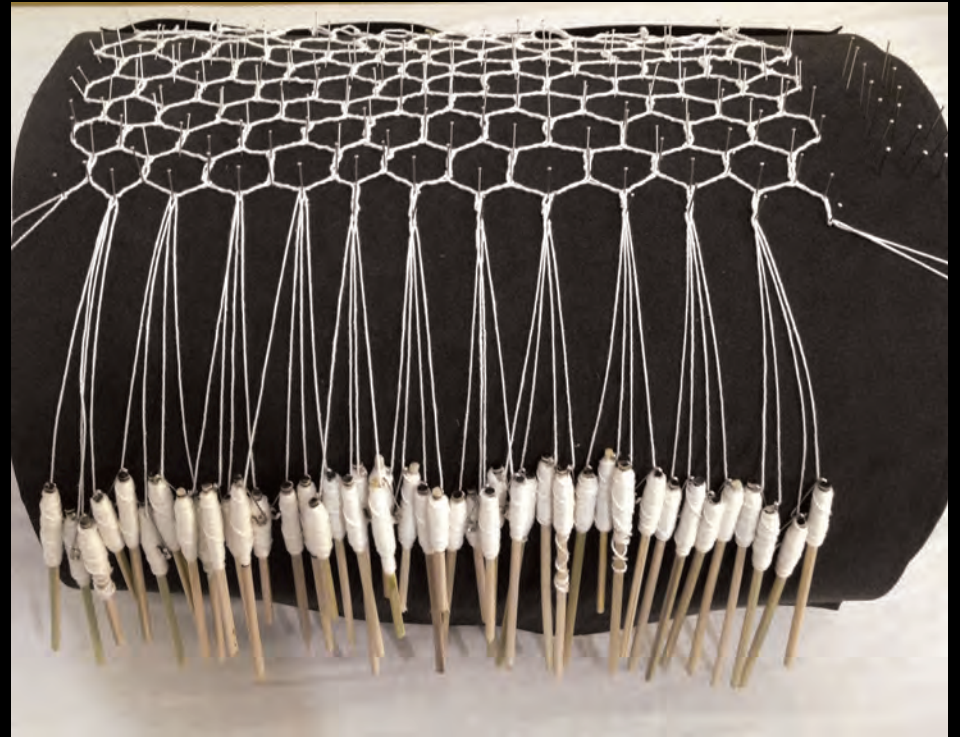
Para facilitar o transporte, as parte rígidas não poderiam passar de 4 m de comprimento, de maneira que possam ser facilmente transportadas em um carro comum com poucas adaptações. Já as peças de encaixe não seriam um problema devido ao seu tamanho reduzido. A rede seria menos trabalhosa visto que pode ser dobrada e comprimida.

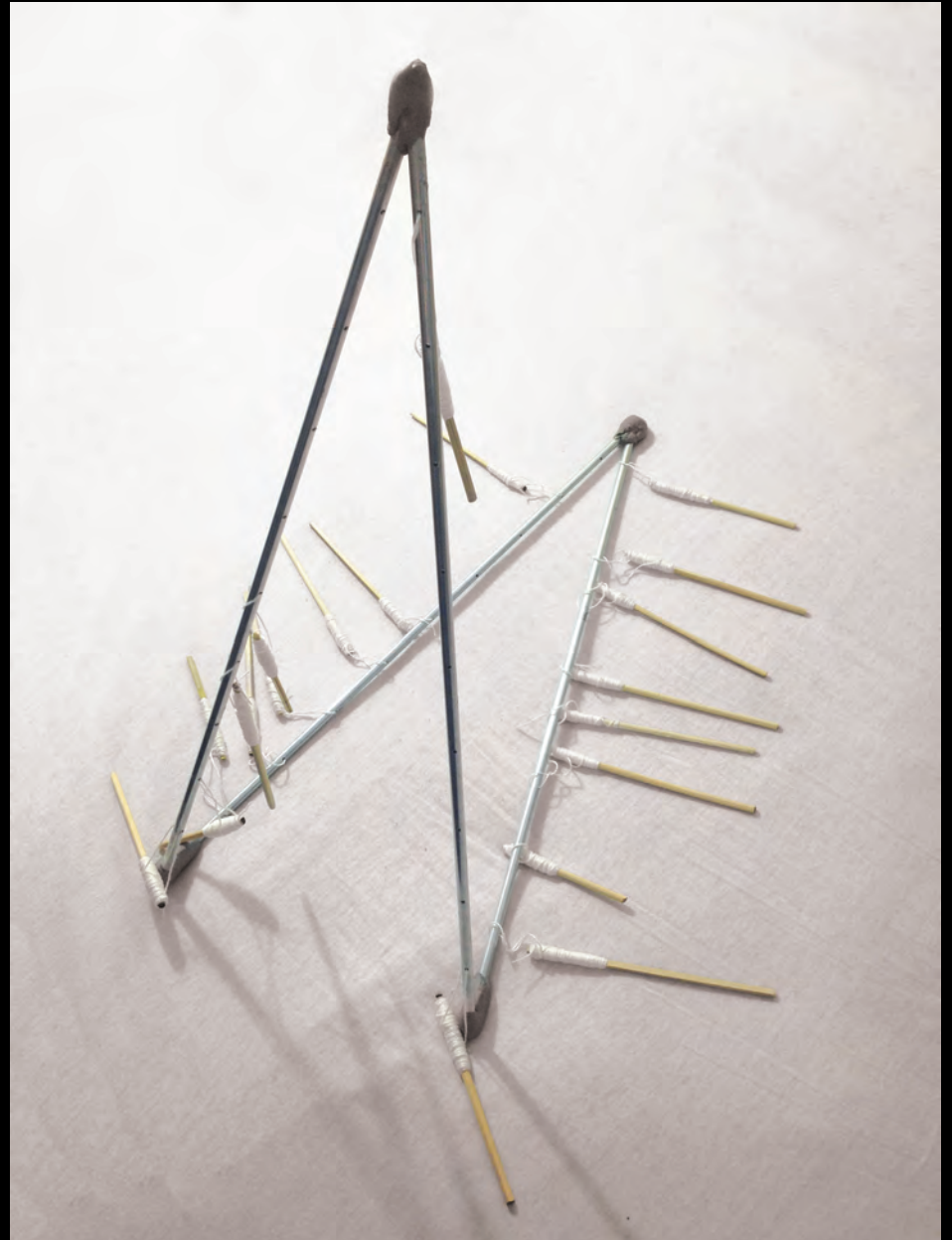
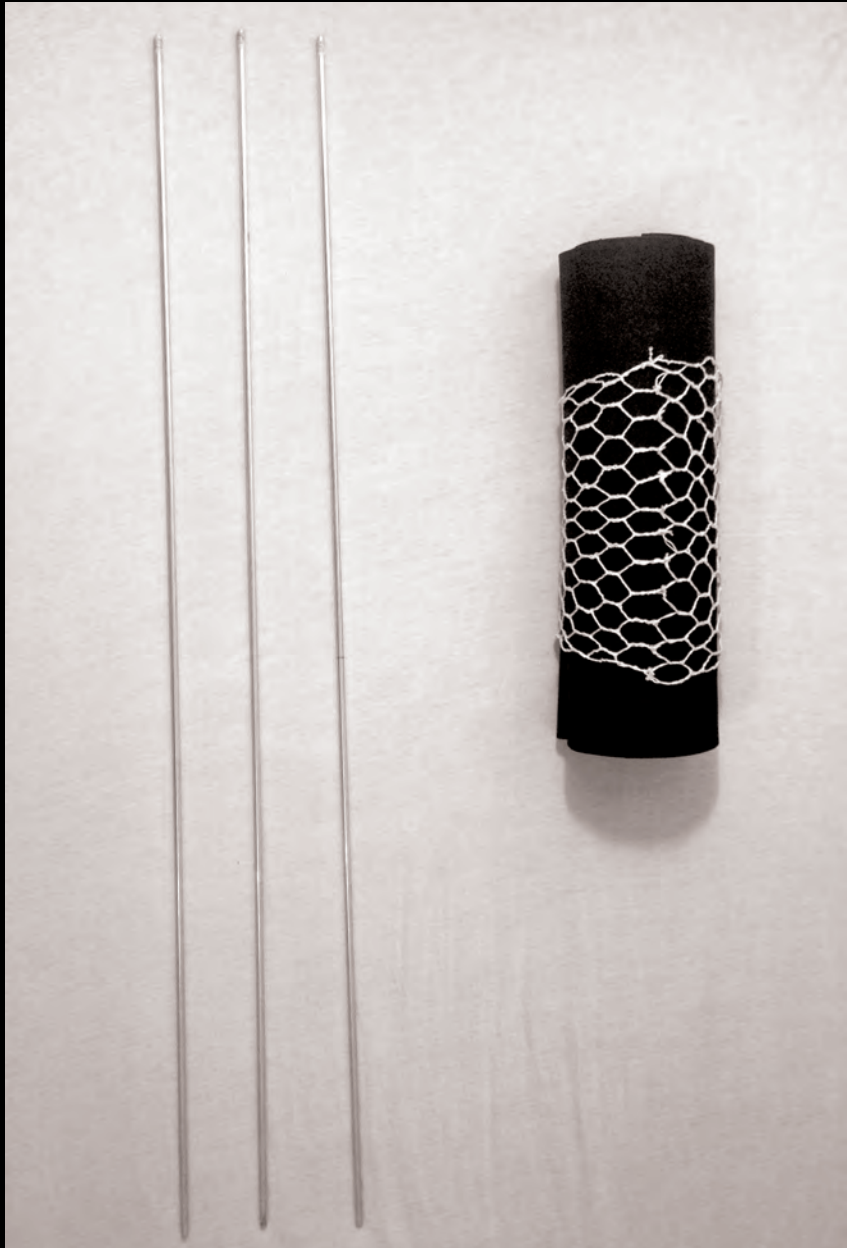
6.3 Montagem

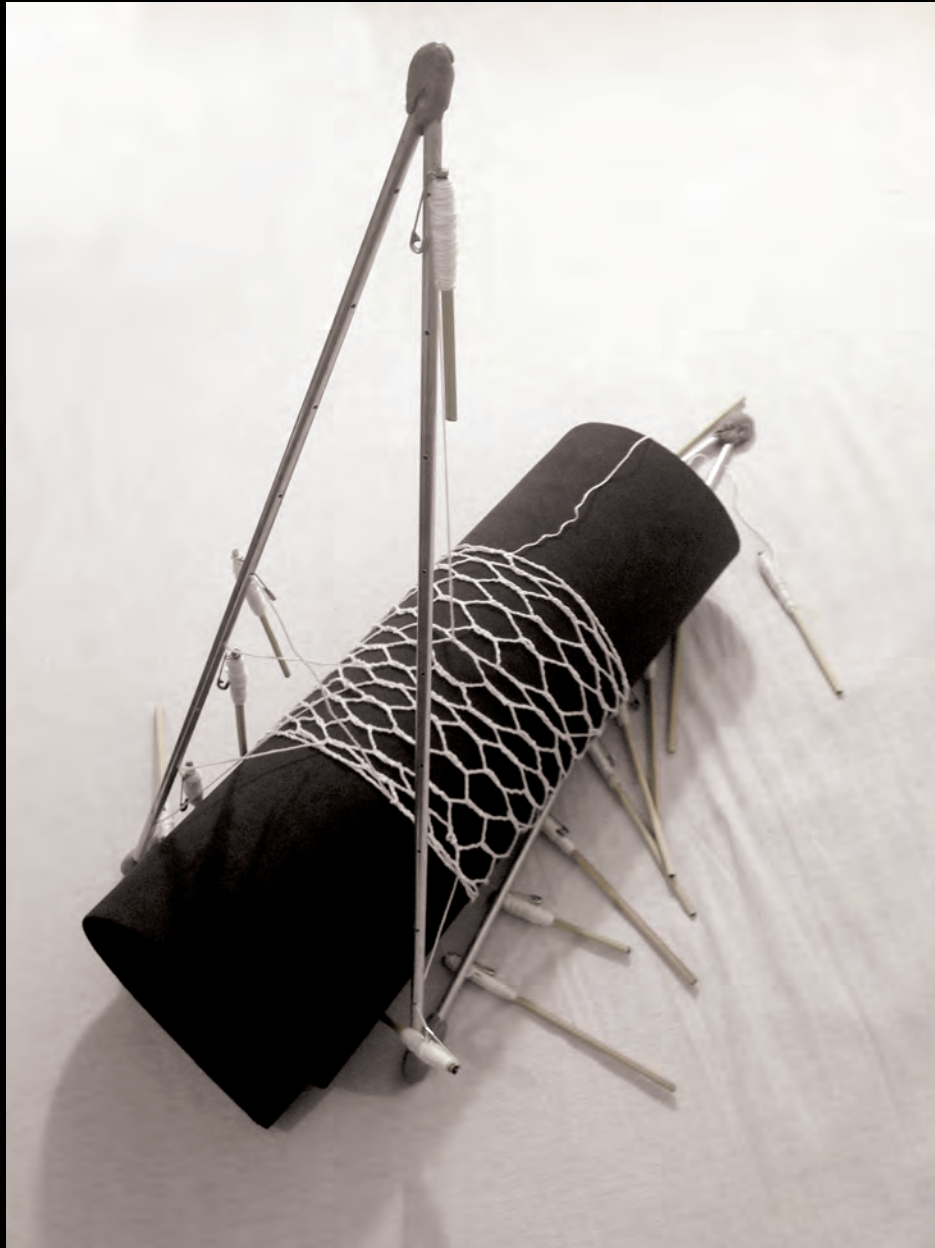
A montagem ocorreria em 3 etapas: a produção da rede, a montagem do esqueleto estrutural e, finalmente, a fixação da rede com cordas e seu tracionamento. Todas as dimensões e pontos de fixação podem ser retirados e documentados utilizando o próprio Grasshopper, evitando assim o desencontro de informações e agilizando o processo de montagem. Como as duas primeiras etapas estão dissociadas uma da outra, elas podem ocorrer em paralelo.

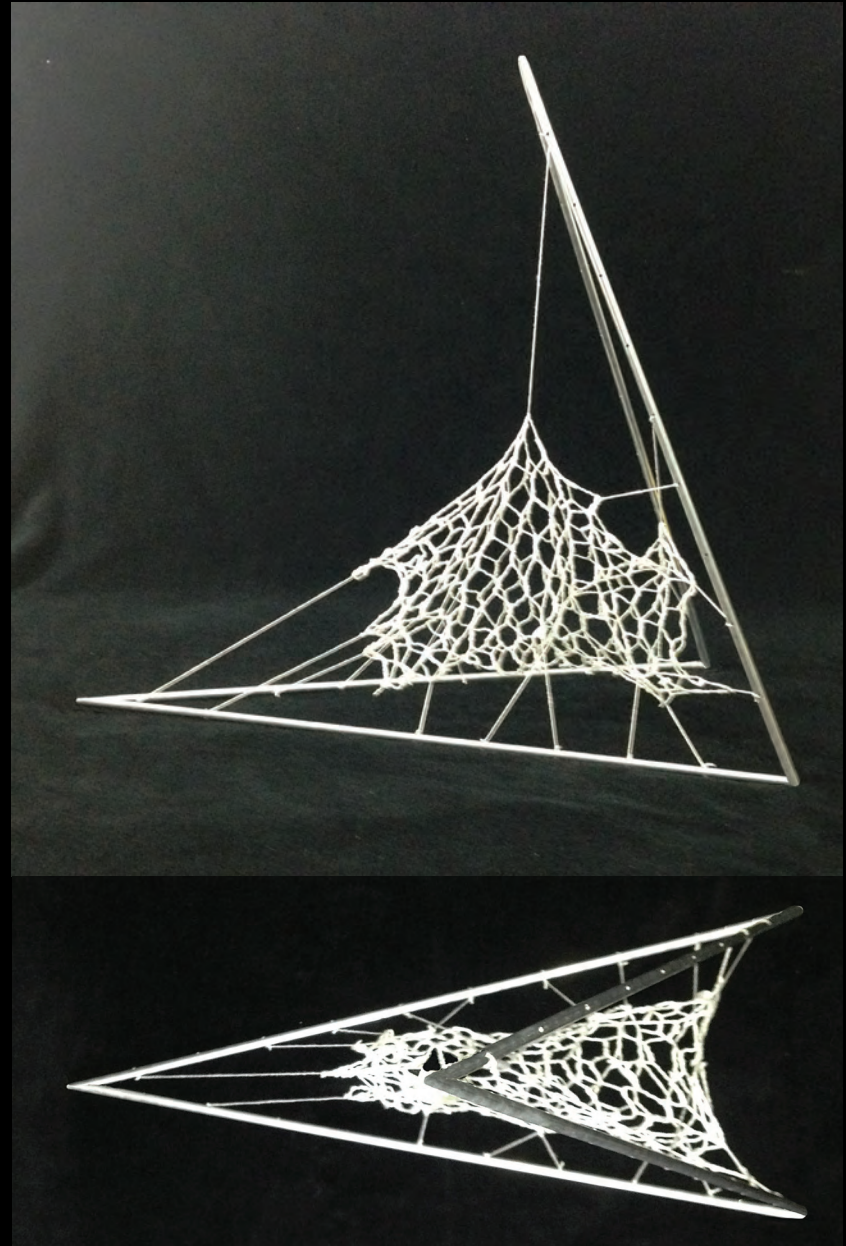
6.4 Modelo físico

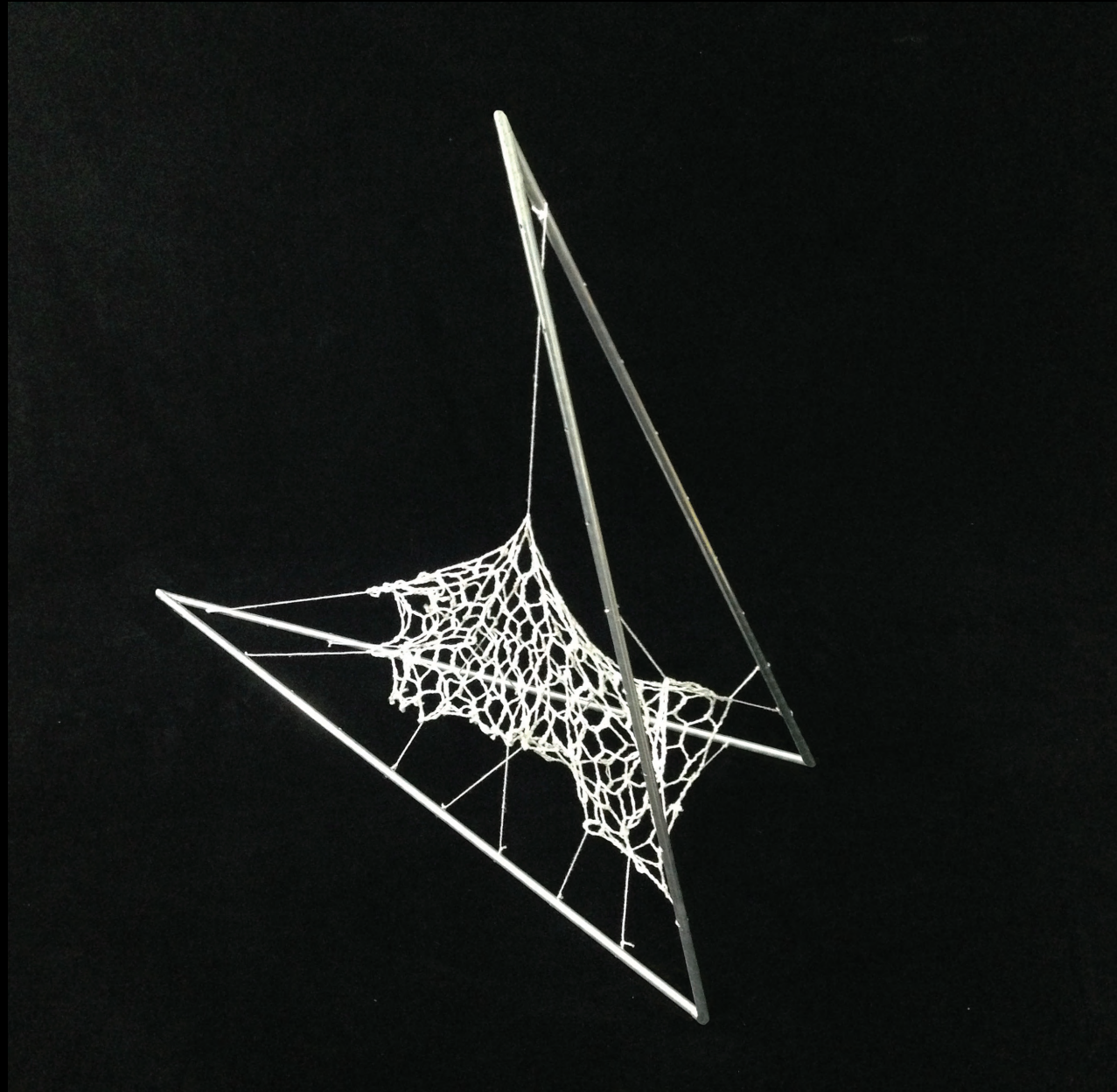




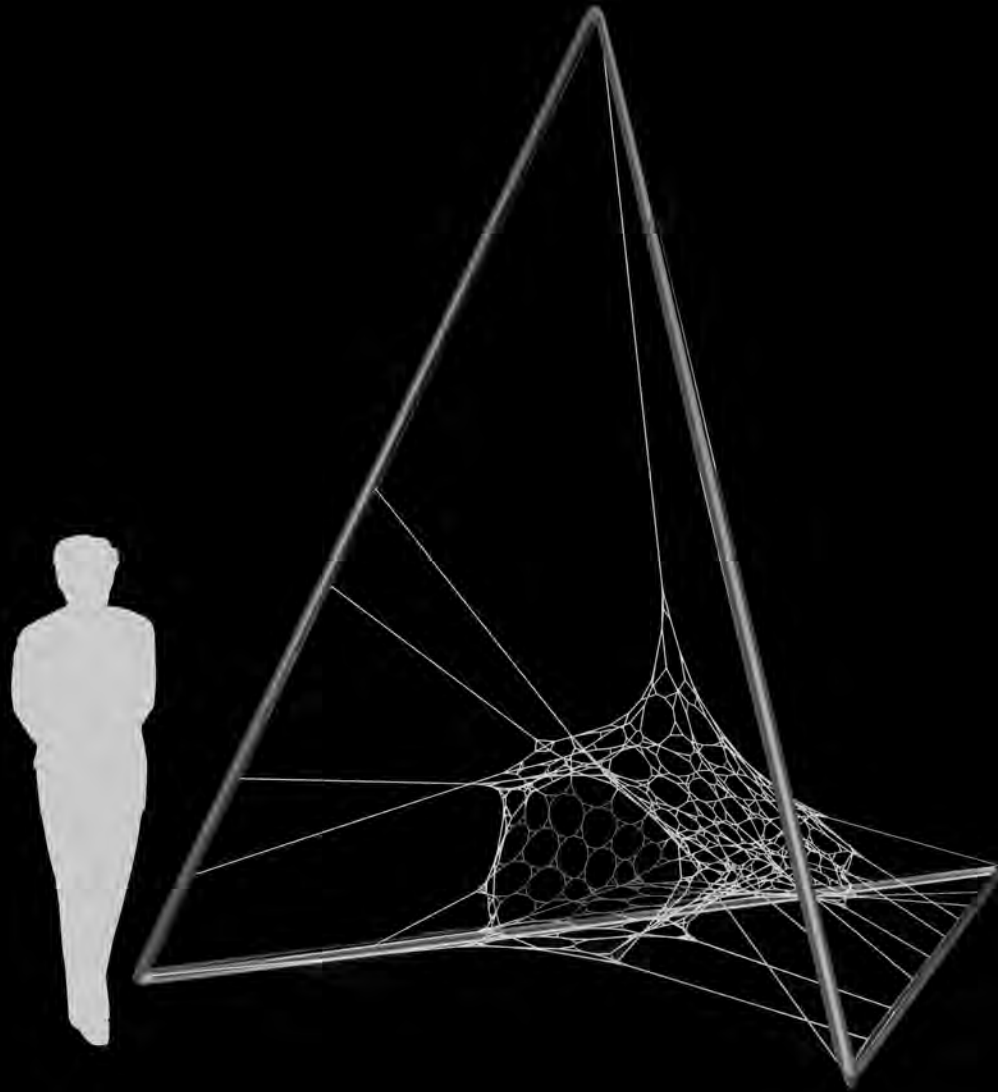








6.5 Render





7 Considerações finais

Este estudo buscou explorar algumas possibilidades de incorporação do design computacional à prática do projeto de arquitetura. A imersão necessária durante a produção deste trabalho resultou em um enorme acúmulo de conhecimento tanto sobre questões tecnológicas, quanto questões filosóficas e conceituais.

Apesar de aqui não terem sido abordadas questões sobre esforços estruturais, observou-se nos estudos de caso e diversas outras pesquisas que este é um campo com um enorme potencial ainda a ser explorado. Aqui foram utilizados dois métodos principais, o simulador de física Kangaroo Physics e o algoritmo evolutivo Galapagos dentro do Grasshopper. Porém, existe um outro *plug-in* que se chama Karamba cuja função é a de avaliar aspectos estruturais como flambagem e cisalhamento, por exemplo. A ideia inicial era a de também utilizá-lo nos estudos, mas devido à sua complexidade e visto que este pavilhão é um projeto de pequena escala, este *plug-in* foi deixado de lado.

O desenvolvimento do algoritmo ainda está em fase inicial, mas com o refinamento certo pode-se chegar a uma técnica alternativa de construção utilizando drones, por exemplo.

A prática da arquitetura está sempre mudando e a necessidade por continuar esse desenvolvimento é crucial. Isso não somente é a chave para a descoberta de inovações e técnicas, mas é também determinante para a ideia de o design ser considerado pivô nas nossas expressões de identidade e diferença.³⁷

Notas

- 1 Tony Fry, Design Futuring: Sustainable, Ethics and New Practice (Oxford: Berg, 2008), p.2
- 2 “Caderno de Diagnóstico, Resíduos da Construção Civil” Acessado 18 Nov 2016 <http://www.cnrh.gov.br/projetos/pnrs/documentos/cadernos/o2_CADDIAG_Res_Const_Civil.pdf>
- 3 ALVES, Maurício K. Industrialização na Construção Civil: Análise da Possibilidade de Adoção de Ações de um Programa de Desenvolvimento Tecnológico Europeu na Construção Civil Brasileira. Porto Alegre: UFRGS, 2016, p. 43-47
- 4 CEOTTO, L. H. A industrialização da construção de edifícios: de passado letárgico para um futuro promissor. In: FARIA, C. P. (Org.). Inovação em construção civil: monografias. São Paulo: Instituto UNIEMP, 2005, p. 85
- 5 “The First Globally Patented 3D Robotic Bricklaying System” Acessado 18 Nov 2016. <<http://fbr.com.au/>>
- 6 “Flying Machine Enabled Construction” Acessado 18 Nov 2016 <<http://www.idsc.ethz.ch/research-dandrea/research-projects/archive/flying-machine-enabled-construction.html>>
- 7 “Primeira casa de 400 m² construída usando uma impressora 3D” tradução livre. Acessado 18 Nov <<http://www.hstdgm.com/>>
- 8 “Levantamento Inédito Mostra Déficit de 6,2 Milhões de Moradias No Brasil” Acessado dia 18 Nov 2016 <www.fiesp.com.br/noticias/levantamento-inedito-mostra-deficit-de-62-milhoes-de-moradias-no-brasil>
- 9 Bill Allen, “IT22329: The Future of BIM Will Not Be BIM—and It’s Coming Faster than You Think” Acessado dia 16 Nov 2016 <<http://au.autodesk.com/au-online/classes-on-demand/class-catalog/2016/revit/it22329>>
- 10 Kosta Terzidis, “Algorithmic Architecture”, Architectural Press (Elsevier), 2006, Burlington, USA, p.14
- 11 Henrique Stabile, Entre o físico e o digital. Processos paramétricos, de interação e de fabricação digital aplicados ao design / Henrique Stabile. - São Paulo, 2015. p.31,
- 12 Brady Peters, ‘Computation Works: The Building Of Algorithmic Thought’, Architectural Design, 2015, p. 10
- 13 Kosta Terzidis, “Algorithmic Architecture”, Architectural Press (Elsevier), 2006, Burlington, USA, p. xiii
- 14 Kosta Terzidis, “Algorithmic Architecture”, Architectural Press (Elsevier), 2006, Burlington, USA, p.5
- 15 Janine M. Benyus, “A Biomimicry Primer” Acessado dia 18 de Nov de 2016 <http://peakstoprairies.org/media/biomimicry_primer.pdf>
- 16 Rainer Barthel, Natural Forms - Architectural Forms. In: Frei Otto - Lightweight Construction, Natural Design ([Basel, Switzerland]: Birkhauser - Publishers for Architecture, 2005), p.28
- 17 “R. BUCKMINSTER FULLER, 1895 – 1983” Acessado dia 18 de Nov de 2016 <<https://www.bfi.org/about-fuller/biography>>
- 18 Tomohiro Tachi, “Interactive Freeform Design of Tensegrity”, The University of Tokyo 2012. Acessado dia 18 de Nov de 2016 <<http://www.tsg.ne.jp/TT/cg/FreeformTensegrityTachiAAG2012.pdf>>
- 19 Tensile-integrity structures - US 3063521 A”, Acessado dia 01 de Dezembro de 2016 <<https://www.google.com/patents/US3063521>>
- 20 Langdon, David. “Montreal Biosphere / Buckminster Fuller”. ArchDaily, 25 Nov. 2014. Disponível em <http://www.archdaily.com/572135/ad-classics-montreal-biosphere-buckminster-fuller/>.
- 21 Rainer Barthel, Natural Forms - Architectural Forms. In: Frei Otto - Lightweight Construction, Natural Design ([Basel, Switzerland]: Birkhauser - Publishers for Architecture, 2005), p.17
- 22 Vários Autores, Frei Otto - Lightweight Construction, Natural Design ([Basel, Switzerland]: Birkhauser - Publishers for Architecture, 2005), p. 227
- 23 Langdon, David. “Clássicos da Arquitetura: Pavilhão Alemão da Expo 67 / Frei Otto e

- Rolf Gutbrod” [AD Classics: German Pavilion, Expo ‘67 / Frei Otto and Rolf Gutbrod] 05 Set 2016. ArchDaily Brasil. (Trad. Souza, Eduardo) Acessado 2 Dez 2016. www.archdaily.com.br/br/794650/classicos-da-arquitetura-pavilhao-alemao-da-expo-67-frei-otto-e-rolf-gutbrod
- 24 Natural Forms - Architectural Forms. In: Frei Otto - Lightweight Construction, Natural Design ([Basel, Switzerland]: Birkhauser - Publishers for Architecture, 2005), p.40
- 25 Tanya Bonakdar Gallery, “TOMAS SARACENO” Acessado 02 Dez 2016 <http://www.tanyabonakdargallery.com/exhibitions/tomas-saraceno_2>
- 26 Designboom, “tomás saraceno at venice art biennale 2009”, Acessado 2 Dez 2016 <<http://www.designboom.com/art/tomas-saraceno-at-venice-art-biennale-09/>>
- 27 Studio Tomás Saraceno, “3D SPIDER WEB SCAN”, Acessado 2 Dez 2016 <<http://tomassaraceno.com/projects/3d-spider-web-scan/>>
- 28 “Biography” Acessado 2 Dez 2016 <<http://www.freiotto.com/Biografie.html>>
- 29 “Achim Menges” Acessado 2 Dez 2016 <<http://www.achimmenges.net/?p=4866>>
- 30 “2014 Stuttgart University, “Landesgartenschau Exhibition Hall” Acessado 17 Nov 2016 <<http://www.achimmenges.net/?p=5731>>
- 31 Wenping Wang and Yang Liu: A Note on Planar Hexagonal Meshes, In I.Z. Emiris, F. Sottile and T. Theobald, editors, IMA Volume 151: Nonlinear Computational Geometry , 221-233, Springer-Verlag, 2009. [DOI][relevant talk: Slides in Workshop on Polyhedral Surfaces and Industrial Applications 2007] Acessado 2 Dez 2016 <<http://research.microsoft.com/en-us/um/people/yangliu/>>
- 32 Maria Beatrice Trujillo, Beatriz De Alcantara and Paula Bedin
- 33 “Nós Art Project” Acessado 2 Dez 2016 <<https://www.catarse.me/nosartproject#about>>
- 34 “AA Visiting School Slovenia, Vitanje 2014” Acessado 6 Dez 2016 <<http://nanotourism.aaschool.ac.uk/15-aavss14/>> - “Hangout Vitanje – Communal Xl Lace Hammock” Acessado 6 Dez 2016 <http://www.archello.com/en/project/hangout-vitanje-%E2%80%93-communal-xl-lace-hammock>
- 35 Ulrich Kull, Frei Otto and Biology. In: Frei Otto - Lightweight Construction, Natural Design ([Basel, Switzerland]: Birkhauser - Publishers for Architecture, 2005), p.51
- 36 Henrique Stabile, Entre o físico e o digital. Processos paramétricos, de interação e de fabricação digital aplicados ao design / Henrique Stabile. - São Paulo, 2015. p.26-27
- 37 Lian Hurst Mann, Reconstructing Architecture: Critical Discourse and Social Practices, ed. By Thomas A. Dutton, Illustrated (Minnesota: U of Minnesota Press, 1996), p. 1.

Imagens

- 1 Fastbrick Robotics bricklaying machine, Hadrian X - <http://cdn.newsapi.com.au/image/v1/3505f92d075199d02fd43b2ffod4a010?width=1024>
- 2 Flight Assembled Architecture - <http://gramaziokohler.arch.ethz.ch/web/d/forschung/209.html>
- 3 <http://au.autodesk.com/au-online/classes-on-demand/class-catalog/2016/revit/it22329>
- 4 © Ernst Haeckel - Spumellaria “Formas de Arte na Natureza”
- 5 Clara Perfeccion por Pasteles Carnívoros - <http://pastelescarnivoros.blogspot.com.br/2013/11/clara-perfeccion.html?m=1>
- 6 Weaver Bird inspecting the nest por Shirish Totade - <https://www.flickr.com/photos/shirishtotade/5977535576>
- 7 Wild comb 4 por Max Westby - https://www.flickr.com/photos/max_westby/4559471/
- 8 Arquivo Pessoal
- 9 @fauselfie - <https://mobile.twitter.com/fauselfie/status/722301153153835008>
- 10 Arquivo Pessoal
- 11 Examples of Geodesic Design in Nature.
- 12 Single and Double Bonding of Members in Tensegrity Spheres: Negatively rotating triangles on a 270-strut tensegrity geodesic sphere with double-bonded triangles. A 270-strut isotropic tensegrity geodesic sphere: single bonded turbo triangles forming a complex six-frequency triacontahedron tensegrity. Complex of basic three-strut tensegrities, with axial alignment whose exterior terminals are to be joined in single bond as 90-strut tensegrity. Complex of basic three-strut tensegrity units with exterior terminals now joined.
Copyright © 1997 Estate of R. Buckminster Fuller
- 13 © AP Photo/Bill Ingraham - <http://www.forbes.com/sites/davidewalt/2011/10/27/buckminster-fullers-design-for-the-stars/#1e88e4a52f8b>
- 14 Autor desconhecido - <http://www.archdaily.com/610531/frei-otto-and-the-importance-of-experimentation-in-architecture>
- 15 © Frei Otto - http://images.adsttc.com/media/images/5507/43e7/e58e/ceoc/oboo/ood/slideshow/C_Frei_Otto.jpg?1426539465
- 16 http://www.mimarizm.com/makale/almanya-pavyonu-yeni-bir-yapi-muhendisligi_115431
- 17 © Frei Otto - http://images.adsttc.com/media/images/5507/43f8/e58e/ceoc/oboo/oooe/large_jpg/Frei-Otto-The-1967-International-and-Universal-Exposition-01.jpg?1426539501
- 18 Cortesia de FAR frohn&rojas - <http://images.adsttc.com/media/images/5834/e2b4/e58e/ce9f/3000/03bd/slideshow/FAR-REF-001.jpg?1479860911>
- 19 http://www.domusweb.it/it/notizie/2014/06/16/cosmic_jive_tomas_saraceno.html?utm_content=buffer65d09&utm_medium=social&utm_source=facebook.com&utm_campaign=buffer
- 20 © Studio Tomás Saraceno, 2010 - Restoring three-dimensional data: The lines were completed by following the vector direction of the captured web information, 2010
- 21 © Studio Tomás Saraceno, 2010 - Restoring three-dimensional data: The lines were completed by following the vector direction of the captured web information, 2010
- 22 © Fabian Birgfeld, PhotoTECTONICS and Studio Saraceno. - Tomás Saraceno. “Galaxies Forming along Filaments, like Droplets along the Strands of a Spider’s Web”, 2008. Installation view, Tanya Bonakdar Gallery, New York, NY, USA.

- 23 © ICD/ITKE/IIGS University of Stuttgart - <http://www.achimmenges.net/?p=573> - Photograph of a sand dollar and microscopic view of a plate connection; images (c) Gerber & Nebelsick / Nebelsick & Grun, University of Tübingen 1
- 24 © Roland Halbe - <http://www.achimmenges.net/?p=5731>
- 25 © Roland Halbe - <http://www.achimmenges.net/?p=5731>
- 26 © Roland Halbe - <http://www.achimmenges.net/?p=5731>
- 27 © ICD/ITKE/IIGS University of Stuttgart - Assembly of structural plywood plates on site - <http://www.achimmenges.net/?p=5731>
- 28 © ICD/ITKE/IIGS University of Stuttgart - Plate geometries on negative and positive gaussian curvature - <http://www.achimmenges.net/?p=5731>
- 29 Autor desconhecido - <https://www.facebook.com/nos.artproject>
- 30 Autor desconhecido - <https://www.facebook.com/nos.artproject>
- 31 Autor desconhecido - <https://www.facebook.com/nos.artproject>
- 32 Autor Ajda Schmidt - <http://www.archello.com/en/project/hangout-vitanje-%E2%80%93-communal-xl-lace-hammock>
- 33 Autor Ajda Schmidt - <http://www.archello.com/en/project/hangout-vitanje-%E2%80%93-communal-xl-lace-hammock>
- 34 “Hang out Vitanje o6” Autor Ajda Schmidt - <http://www.archello.com/en/project/hangout-vitanje-%E2%80%93-communal-xl-lace-hammock>
- 35 Autor Ajda Schmidt - <http://www.archello.com/en/project/hangout-vitanje-%E2%80%93-communal-xl-lace-hammock>
- 36 Fonte: Google Earth
- 37 Autor Foto: Marcos Santos
- 38 Logotipo FAUUSP
- 39 Tear mecânico e os cartões perfurados de Joseph-Marie Jacquard - Autor: David Monniaux - https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/b6/Jacquard_loom_p1040320.jpg
- 40 DOUBLE TORCHON GROUND BOBBIN LACE - <http://howdidiyoumakethis.com/double-torchon-ground-bobbins-lace/>
- 41 DOUBLE TORCHON GROUND BOBBIN LACE - <http://howdidiyoumakethis.com/double-torchon-ground-bobbins-lace/>
- 42 DOUBLE TORCHON GROUND BOBBIN LACE - <http://howdidiyoumakethis.com/double-torchon-ground-bobbins-lace/>
- 43 DOUBLE TORCHON GROUND BOBBIN LACE - <http://howdidiyoumakethis.com/double-torchon-ground-bobbins-lace/>
- 44 Aerial Construction - <http://www.idsc.ethz.ch/research-dandrea/research-projects/aerial-construction.html>
- 45 Aerial Construction - <http://www.idsc.ethz.ch/research-dandrea/research-projects/aerial-construction.html>

8 Referências bibliográficas

8.1 Artigos

Caderno de Diagnóstico, Resíduos da Construção Civil” Acessado 18 Nov 2016 <http://www.cnrh.gov.br/projetos/pnrs/documentos/cadernos/o2_CADDIAG_Res_Const_Civil.pdf>

Janine M. Benyus, “A Biomimicry Primer” Acessado dia 18 de Nov de 2016 <http://peakstoprairies.org/media/biomimicry_primer.pdf>

Schumacher, Patrik, In Defense of Parametricism, London, 2016 < <http://www.patrikschumacher.com/>>

8.2 Livros

VASCONCELOS, Augusto Carlos, Estruturas da Natureza, Studio Nobel, 2000, 311 p.

FRY, Tony, Design Futuring: Sustainable, Ethics and New Practice, Oxford: Berg, 2008, 256 p.

FRAZER, J. An Evolutionary Architecture. London - UK: AA Publications, 1995. *On-line*

TERZIDIS, K. Algorithmic Architecture. Burlington - MA: Elsevier Ltd, 2006, 176 p.

TEDESCHI, Arturo. AAD_Algorithms-Aided Design: Parametric Strategies using Grasshopper. Italy: Le Penseur, 2014. 495 p.

JABI, Wassim. Parametric Design for Architecture. First edition. London: Laurence King Publishing Ltd, 2013. 208 p.

KHABAZI, Zubin. Generative Algorithms (using Grasshopper). Digitally published. 2012

KHABAZI, Zubin. Generative Algorithms: Concepts and Experiments: Strip Morphologies. Digitally published. 2011

JABI, Wassim. Parametric Design for Architecture. First edition. London: Laurence King Publishing Ltd, 2013. 208 p.

Vários Autores, Frei Otto - Lightweight Construction, Natural Design ([Basel, Switzerland]: Birkhauser, 2005, 391 p.

8.3 Periódicos

PETERS, Brady, 'Computation Works: The Building Of Algorithmic Thought', Architectural Design, 2015, 152 p.

MENGES, Achim, Computational Design Thinking: Computation Design Thinking, Architectural Design, 2011, 224 p.

8.4 Teses e dissertações

Nascimento, Anelise Ventura. "Fronteiras Permeáveis entre a Arquitetura e a Biologia: Processos de Projeto Digital, São Carlos 2014, Dissertação de Mestrado IAUUSP orientador Anja Pratschke. São Carlos, 2014.

Natividade, Verônica Gomes. Fraturas metodológicas nas arquiteturas digitais, São Paulo, 2010. 302 p. Dissertação de Mestrado FAUUSP Orientador: Alessandro Ventura

Stabile, Henrique, Entre o físico e o digital. Processos paramétricos, de interação e de fabricação digital aplicados ao design, São Paulo, 2015. 147 p. Dissertação de Mestrado FAUUSP. Orientador: Carlos Roberto Zibel Costa

LARA, Arthur Hunold, Modelos dinâmicos de representação no ensino da arquitetura e design, São Paulo, 2016. 177 p. Tese de Livre-docência - Departamento de Tecnologia – FAUUSP.

Makert, Rodrigo, Entre o Designer e o Design: Considerações sobre processos digitais de projeto, Monografia de Especialista - FAENG Orientador: Prof. Dr. Gilfranco Alves

ALVES, Maurício K. Industrialização na Construção Civil: Análise da Possibilidade de Adoção de Ações de um Programa de Desenvolvimento Tecnológico Europeu na Construção Civil Brasileira. Porto Alegre: UFRGS, 2016

EOTTO, L. H. A industrialização da construção de edifícios: de passado letárgico para um futuro promissor. In: FARIA, C. P. (Org.). Inovação em construção civil: monografias. São Paulo: Instituto UNIEMP, 2005

Lian Hurst Mann, Reconstructing Architecture: Critical Discourse and Social Practices, ed. By Thomas A. Dutton, Illustrated (Minnesota: U of Minnesota Press, 1996.

8.5 Sites Relevantes

<http://www.grasshopper3d.com/>

<http://www.morphogenesisism.com/>

<http://www.co-de-it.com/wordpress/>

<https://ieatbugsforbreakfast.wordpress.com/>

<https://digitalsubstance.wordpress.com/>

<http://subsetsystem.blogspot.com.br/>

<http://exlab.org/>

<http://formularch.blogspot.com.br/>

<http://www.tsg.ne.jp/TT/cg/>

https://issuu.com/studio_air

<http://www.johnfrazer.com/author.html>

<http://www.achimmenges.net>

<http://www.evolo.us/category/architecture/>

