



Design Computacional e Performance Acústica

CARINA FONSECA DO CARMO

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

Design Computacional e Performance Acústica

CARINA FONSECA DO CARMO



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
FACULDADE DE ARQUITETURA E URBANISMO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA

Design Computacional e Performance Acústica

Carina Fonseca do Carmo

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Arquitetura da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ciências em Arquitetura, Área de Concentração Arquitetura, Projeto e Sustentabilidade, Linha de Pesquisa Conforto Acústico no Ambiente Construído.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Maria Lygia Niemeyer

Coorientador: Prof. Dr. Andrés Passaro

Rio de Janeiro
Dezembro 2018

CIP - Catalogação na Publicação

F287d Fonseca do Carmo, Carina
Design Computacional e Performance Acústica /
Carina Fonseca do Carmo. -- Rio de Janeiro, 2018.
158 f.

Orientadora: Maria Lygia Niemeyer.
Coorientadora: Andrés Passaro.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do
Rio de Janeiro, Faculdade de Arquitetura e
Urbanismo, Programa de Pós-Graduação em Arquitetura,
2018.

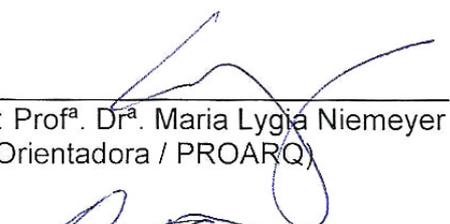
1. Design Computacional. 2. Acústica
Arquitetônica. 3. Desenho Paramétrico. 4. Algoritmos
Genéticos. I. Niemeyer, Maria Lygia, orient. II.
Passaro, Andrés, coorient. III. Título.

Carina Fonseca do Carmo

Design Computacional e Performance Acústica

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Arquitetura da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ciências em Arquitetura.

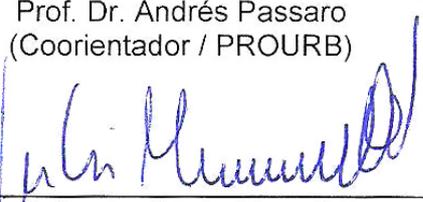
Aprovada por:



Presidente: Prof^a. Dr^a. Maria Lygia Niemeyer
(Orientadora / PROARQ)



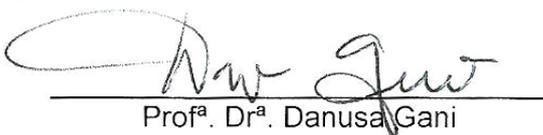
Prof. Dr. Andrés Passaro
(Coorientador / PROURB)



Prof. Dr. José Luis Menegotto
(POLI / UFRJ)



Prof^a. Dr^a. Mônica Salgado
(PROARQ / UFRJ)



Prof^a. Dr^a. Danusa Gani
(EBA / UFRJ)

Rio de Janeiro

Dezembro de 2018

Design Computacional e Performance Acústica

Carina Fonseca do Carmo

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Maria Lygia Niemeyer

Coorientador: Prof. Dr. Andrés Passaro

Resumo da Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Arquitetura da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ciências em Arquitetura.

A presente dissertação tem como objetivo discutir o uso do Design Computacional, com métodos generativos e paramétricos, baseados no desempenho técnico acústico na etapa de geração da forma arquitetônica do processo de projeto. Apesar do Design Computacional ser uma área de pesquisa que se insere na teoria da arquitetura, com a finalidade de estudar o processo de projeto apoiada nas ciências cognitivas, e pode ou não estar associada ao uso da ferramenta computacional (Celani, 2008), foi dado ênfase às práticas que se utilizam dos avanços tecnológicos ferramentais, atualmente disponíveis nos escritórios de arquitetura. A pesquisa é inicialmente orientada pela classificação de softwares proposta por Oxman (2005), que associa tipos de softwares às metodologias e técnicas de geração da forma apoiada em processos lógicos explícitos, diferente das práticas tradicionais de geração da forma, baseado no conhecimento implícito, associado à intuição e a criatividade. Além da visão de Oxman (2005) a fundamentação é complementada pela visão de outros autores que falam especificamente sobre cada metodologia ou técnica, e com exemplos práticos do uso dos processos mais relevantes ao trabalho. Ainda na fundamentação, o trabalho aborda questões de otimização técnica com foco na Acústica Arquitetônica, onde são apresentadas tanto visões críticas sobre o quanto a otimização de um aspecto técnico deve impactar na forma arquitetônica, quanto noções básicas de acústica que irão contribuir na parte prática do trabalho. Após a etapa de levantamento teórico dois experimentos foram produzidos: o primeiro com o método dos algoritmos genéticos, e segundo com o uso de técnicas de parametrização; ambos propondo soluções espaciais com base no desempenho técnico acústico. Tais experimentações deflagraram discussões sobre diferentes maneiras de gerar a forma, que contribuiu para um pensamento crítico sobre a construção lógica dos algoritmos e possibilidades de adaptação da forma inserida em um meio em constante alteração.

Palavras-chave: Design Computacional; Acústica Arquitetônica; Algoritmos Genéticos; Desenho Paramétrico.

Computational Design and Acoustic Performance

Carina Fonseca do Carmo

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Maria Lygia Niemeyer

Coorientador: Prof. Dr. Andrés Passaro

Abstract of the Master Dissertation presented to the Graduate Program in Architecture of the Faculty of Architecture and Urbanism of the Federal University of Rio de Janeiro (UFRJ), as part of the requisites required to obtain a Master's degree in Sciences in Architecture.

The present dissertation aims to discuss the use of Computational Design, with generative and parametric methods based on acoustic technical performance, in the steps of from generation on design process. Although Computational Design is an area of research that is part of the architecture theory, with the purpose of studying the design process supported in the cognitive sciences, and could or not being associated to the use of the computational tool (Celani, 2008), this work gives emphasis on the practices that uses technological advances tooling, currently available in the offices of architecture. The research is initially oriented by the software classification proposed by Oxman (2005), which associates types of software to the methodologies and techniques of form generation supported in explicit logical processes, different from the traditional practices of form generation, based on implicit knowledge, associated to intuition and creativity. In addition to the view of Oxman (2005), the theoretical foundation is complemented by the view of other authors who speak specifically about each methodology or technique, and with practical examples of using the most relevant processes to work. Still in the foundation, the work also addresses technical optimization issues with a focus on Architectural Acoustics, where both critical views are presented on how optimization of a technical aspect should impact the architectural form, as well as basic notions of acoustics that will contribute to the practical part of work. After the theoretical survey, two experiments were carried out: the first with the method of genetic algorithms, and second with the use of parametrization techniques; both proposing spatial solutions based on acoustic technical performance. Such experiments have sparked discussions about different ways of generating form, and contributed to a critical thinking about the logical construction of algorithms and possibilities of adaptation of the form inserted in a constantly changing environment.

Keywords: Computational Design; Architectural Acoustics; Genetic Algorithms; Parametric Design.

SUMÁRIO

	INTRODUÇÃO	.	15
	capítulo I: DESIGN COMPUTACIONAL	I	25
.....	Design Computacional Digital	I.1	30
.....	CLASSE FORMATIVA	I.1.1	35
.....	CLASSE GENERATIVA	I.1.2	45
	capítulo II: ACÚSTICA ARQUITETÔNICA	II	61
.....	Relação entre Acústica e Forma Arquitetônica	II.1	61
.....	CONCEITOS BÁSICOS DA ACÚSTICA	II.1.1	63
.....	CAMPOS SONOROS	II.1.2	66
.....	ESTUDO GEOMÉTRICO-ACÚSTICO	II.1.3	75
.....	Impacto da Performance sobre a Forma Arquitetônica	II.2	88
	capítulo III: EXPERIMENTOS	III	95
.....	Experimento 1: processo performativo generativo - Algoritmos Genéticos	III.1	97
.....	PRÉ-EXPERIMENTO: AUTOMATIZAÇÃO DA REPRESENTAÇÃO DE RAIOS	III.1.1	99
.....	ALGORÍTMOS GENÉTICOS	III.1.2	110
.....	Problema projetual	III.1.2.1	110
.....	Estratégias para solução do problema	III.1.2.2	111
.....	Definição da função fitness	III.1.2.3	114
.....	Ajustes e etapas finais	III.1.2.4	115
.....	Experimento 2: processo performativo formativo - paramétrico	III.2	120
.....	PROPOSTA PROJETUAL	III.2.1	120
.....	PRÉ-EXPERIMENTO	III.2.2	122
.....	Primeira Modelagem	III.2.2.1	122
.....	Segunda Modelagem	III.2.2.2	123
.....	Conclusão Pré-experimento	III.2.2.3	126
.....	O ALGORITMO	III.2.3	126
	CONSIDERAÇÕES FINAIS	.	135
	ANEXO	.	143
	BIBLIOGRAFIA	.	148
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	.	150
	SITES VISITADOS	.	152
	LISTA DE IMAGENS	.	153

INTRODUÇÃO

Uma das principais contribuições das ferramentas digitais de Design Computacional, no auxílio ao projeto de arquitetura, é o alto controle sobre o fluxo de informações no processo de geração de forma; uma vez que tais ferramentas exigem que o arquiteto explicita de maneira nítida as regras definidas e as decisões tomadas, tornando as informações do processo sempre passíveis de serem revisitadas. Historicamente, a prática projetual sempre se utilizou de regras na geração formal, visto que *“regras são essenciais ao projeto; sem elas há apenas livre-expressão”* (GROSS, 1985, p. 4)¹. Nos processos tradicionais de projeto, regras são definidas e aplicadas de maneira implícita na geração da forma, e ao longo do processo de projeto, dada as inúmeras necessidades de revisão, algumas regras inicialmente definidas acabam por serem esquecidas e preteridas, são informações importantes que se perdem, podendo interferir sob vários aspectos na qualidade do projeto, gerando soluções frágeis. Os softwares de Design Computacional estimulam o profissional a explicitar este processo, garantindo que tais regras não sejam desconsideradas. Esta vantagem se manifesta principalmente em projetos mais complexos que demandam maior controle,

¹ Citação traduzida pela autora, do inglês: *“Rules are essential to design; without them we have only free-expression.”* (GROSS, 1985)

pelo grande volume de informações para gerenciamento, tanto em projeto de arquitetura quanto na compatibilização das demais disciplinas.

Apesar das vantagens que o Design Computacional agrega ao processo de projeto; muitos profissionais resistem a utilizar seus métodos e ferramentas, pois estas exigem conhecimentos de programação, quando associadas ao computador. O arquiteto que utiliza estes meios, além das questões formais e funcionais inerentes ao projeto, precisa saber lidar com a organização de árvores de dados e outros procedimentos, antes restritos à disciplina de tecnologia da informação e da matemática, isto porque a construção das regras, nestes softwares, dá-se através da produção de algoritmos. Como maneira de superar esta dificuldade, os desenvolvedores de softwares têm criado artifícios para aproximar as ferramentas da linguagem dos arquitetos. Como é o caso do Grasshopper, software de programação gráfica onde o profissional não precisa lidar constantemente com a linguagem alfanumérica, pois muitos dos comandos são agrupados em caixas, conectadas umas às outras, tornando o processo mais intuitivo, pois a visualização do resultado formal da união dos elementos de programação, é imediata.

As vantagens de explicitar as regras estabelecidas ao longo do processo de projeto arquitetônico, vão além do maior controle das informações, com o passo a passo da geração da forma evidenciado, o profissional ganha maior capacidade de análise sobre o processo. Para o arquiteto Fabian Scheurer, *“quando você deixa de desenhar construções para projetar algoritmos que desenham construções, você está mudando o nível de*

abstração, mas não o nível de responsabilidade” (2013, p. 195)².
E através desta abstração, novos níveis de reflexão sobre o projeto podem ser alcançados.

O uso de ferramentas digitais de Design Computacional apresenta grande potencial para aplicações no âmbito da Acústica Arquitetônica porque permite associar alto controle formal ao desempenho desejado. O estudo da forma, por sua repercussão na sonoridade do espaço, é uma das etapas de trabalho obrigatória para arquitetos que se dedicam ao projeto de salas destinadas à música ou teatro. Outro aspecto que corrobora para a aproximação entre os temas é a demanda por softwares capazes de transformar elementos arquitetônicos em cadeias de dados numéricos de parâmetros acústicos que permitam avaliar aspectos subjetivos da percepção sonora através de parâmetros objetivos.

Os aspectos formais de uma sala – fechada ou aberta, composta por três, quatro ou mais paredes, constituída por superfícies planas, côncavas ou convexas – impactam diretamente na recepção de um som emitido, ou seja, o controle da sonoridade pode ser realizado através da manipulação formal dos espaços. A automatização da forma e o alto controle sobre sua manipulação decorrente do uso de ferramentas computacionais, através da rapidez e precisão de cálculos e da visualização imediata das soluções formais, incrementa o seu potencial de uso em projetos para Acústica Arquitetônica. Além disso, a possibilidade de gerar uma forma comprometida

² Citação traduzida pela autora, do inglês: “When we move from designing buildings to designing algorithms that design buildings, we are just changing the level of abstraction, but not the level of responsibility.” (SCHEURER, 2013, p. 195)

com o desempenho esperado – otimização – pode resultar em economia de recursos e na produção de espaços adequados ao uso pretendido.

A motivação desta pesquisa decorre do interesse pelos processos de geração da forma, e pela ideia de que a forma pode ser atuante sobre determinados aspectos – como no caso do condicionamento acústico dos espaços. A pesquisa é orientada pela Prof. Dra. Maria Lygia Niemeyer, que atua nas áreas de Acústica Arquitetônica e Ambiental, apoiadas em simulação computacional, e coorientada pelo Prof. Dr. Andrés Passaro da FAU/UFRJ pesquisador de Design Computacional e Fabricação Digital. Anteriormente, a autora colaborou com o Prof. Dr. Andrés Passaro no desenvolvimento de pesquisas do impacto das ferramentas computacionais no estudo de arquitetura, participando de workshops e congressos que discutiam métodos emergentes de geração da forma. O interesse pela acústica surge após o ingresso no Programa de Mestrado no PROARQ, e pela a possibilidade de expandir a pesquisa em otimização de desempenho acústico pela manipulação da forma.

Na presente dissertação serão exploradas algumas possibilidades oferecidas pelo uso de softwares de design computacional em projetos de acústica arquitetônica. Durante a pesquisa procurou-se construir um senso crítico sobre as vantagens que a ferramenta proporciona e quais elementos são, em verdade, um resgate de técnicas já utilizadas por muitos profissionais para estudo geométrico acústico dos

espaços, potencializadas pela rapidez e precisão de ferramentas computacionais para projeto, como as técnicas paramétricas e Algoritmos Genéticos. Os métodos computacionais para geração de forma buscam reduzir custos melhorando o condicionamento acústico de espaços, uma melhoria técnica com diminuição de recursos que força o profissional a revisitar suas bases metodológicas. Esta proposta nos faz refletir sobre impactos estéticos na arquitetura: desde os limites que a técnica impõe sobre a forma, até as reflexões que a experimentação de uma nova metodologia pode acrescentar quando nos propusemos à abstrair um determinado processo já conhecido.

O objetivo geral da pesquisa é discutir o uso do Design Computacional, com base em métodos generativos e paramétricos baseados no desempenho técnico acústico, na etapa de geração da forma arquitetônica do processo de projeto.

Os objetivos específicos são:

- Realizar o levantamento dos tipos de ferramentas computacionais de auxílio ao projeto além das técnicas e metodologias de interesse;
- Apresentar a visão crítica de diversos autores sobre o uso destas tecnologias;
- Apresentar os fundamentos teóricos de acústica com foco nas propriedades geométricas das superfícies diretamente relacionados com as experimentações;
- Desenvolver experimentos baseados no uso das ferramentas para controle da reflexão sonora.

A pesquisa é do tipo exploratória, envolvendo simulações e otimização acústica, visando a experimentação crítica a partir dos métodos extraídos da revisão bibliográfica.

A metodologia se divide nas seguintes fases: (1) levantamento de tipos de ferramentas computacionais para auxílio em projeto, (2) levantamento de técnicas e metodologias de interesse, (3) levantamento de visões críticas sobre o uso destas tecnologias, (4) levantamento das propriedades acústicas essenciais às experimentações, (5) levantamento de geometrias básicas de interesse acústico, (6) desenvolvimento das experimentações, (7) reflexão sobre os processos experimentados.

Cada fase apresenta métodos específicos a serem concluídos para o correto andamento da pesquisa. Os principais são:

Fase 1: levantamento de tipos de ferramentas computacionais para auxílio em projeto:

- Comparar tipos de softwares disponíveis, suas limitações e possibilidades;
- Selecionar softwares de interesse para projeto de acústica arquitetônica.

Fase 2: levantamento de técnicas e metodologias de interesse:

- Levantar métodos e técnicas de parametrização e otimização técnica.

Fase 3: levantamento de visões críticas sobre o uso destas tecnologias:

- Levantar processos similares na história da arquitetura;
- Identificar o que a tecnologia traz de novidade no processo de projeto;

- Levantar visões críticas sobre o Design Computacional de teóricos e práticos.

Fase 4: levantamento dos fundamentos acústicos essenciais às experimentações:

- Levantar as propriedades geométrico –acústicas das formas estudadas;
- Identificar processos de reflexão sonora que possam ser replicados durante os experimentos;

Fase 5: levantamento de geometrias básicas de interesse acústico:

- Estudar curvas bidimensionais notáveis na acústica;
- Identificar transformações geométricas aplicadas às curvas, que gerem superfícies úteis ao desenvolvimento dos experimentos;

Fase 6: desenvolvimento das experimentações:

- Propor experimentos que propiciem reflexões sobre abstração dos processos de geração da forma;
- Aplicar métodos estudados na geração de formas comprometidas com o desempenho acústico.

Fase 7: Reflexão a aplicação acústica dos processos experimentados:

- Analisar a forma gerada em cada experimento;
- Comparar as decisões escolhidas e o impacto sobre a forma;
- Identificar e discutir as possibilidades de desdobramentos e evolução da pesquisa.

O primeiro capítulo é reservado à Revisão Bibliográfica de Design Computacional, onde, através da fundamentação teórica são desenvolvidas as fases: (1) levantamento de tipos de ferramentas computacionais para auxílio em projeto, (2) levantamento de técnicas e metodologias de interesse, (3) levantamento de visões críticas sobre o uso destas tecnologias.

O segundo capítulo está destinado à Revisão Bibliográfica da Acústica arquitetônica e sua relação com a geometria, nesta etapa com a fundamentação teórica, desenvolvem-se as fases: (4) levantamento das propriedades acústicas essenciais às experimentações, (5) levantamento de geometrias básicas de interesse acústico.

No terceiro capítulo estão os experimentos, com a fase de (6) desenvolvimento das experimentações. A partir do uso das técnicas e métodos em Design Computacional e Acústica Arquitetônica, levantados na fundamentação teórica, foram escolhidas diretrizes para duas experimentações, com aplicação de diferentes métodos, no intuito de explorar duas possibilidades distintas de geração da forma arquitetônica, com comprometimento de desempenho acústico desejável através do uso de ferramentas computacionais de Design Computacional. Neste capítulo procura-se demonstrar as idas e vindas das decisões projetuais que assumiram um caminho não linear, bem como as dificuldades inerentes a cada método.

E por fim, as considerações finais, com apresentação da fase de (7) reflexão sobre os processos experimentados. Através da abstração dos processos experimentados, surgem algumas reflexões sobre a diferença entre manipulação formal e tipos

de geração ou instanciamento da forma. A partir das análises, identifica-se novas diretrizes para a continuação da pesquisa.

Vale ressaltar que durante as discussões o termo instanciamento será bastante utilizado neste trabalho. Segundo o dicionário inglês Collins em versão *web*, o substantivo “*instantiation*” traduzido para o português como **instanciamento**, no campo semântico da lógica, é “*o processo de derivar uma declaração individual de uma declaração geral, substituindo a variável por um nome ou outra expressão referente*”³. Portanto, para este trabalho, cujo um dos temas centrais é a produção da forma através de processos lógicos com algoritmos e variáveis, o termo utilizado para o ato de atribuir um valor fixo às variáveis, a fim de resultar na geração de uma nova forma, será **instanciamento formal** ou **instanciamento da forma**.

³ Citação traduzida pela autora, do inglês: “*the process of deriving an individual statement from a general one by replacing the variable with a name or other referring expression.*” In: <https://www.collinsdictionary.com/pt/dictionary/english/instantiation>

capítulo I: DESIGN COMPUTACIONAL

“Ferramentas não existem isoladamente. Ferramentas exigem habilidades complementares para serem efetivamente utilizadas. Uma ferramenta computacional requer habilidades cognitivas” (AISH, 2013).⁴

O Design Computacional, traduzido do termo inglês *computational design*, ou *design computing* é uma área de pesquisa que se insere na teoria da arquitetura, e estuda o processo de projeto apoiado no desenvolvimento lógico da forma.

“Apesar de o nome remeter ao uso de computadores, o design computing não consiste, necessariamente, na implementação de aplicativos em computador ou no uso da programação, implicando, simplesmente, uma maneira de pensar sobre o projeto de maneira lógica e matemática. A palavra em inglês computation refere-se a qualquer tipo de processamento de informações, incluindo desde a realização de operações elementares até o estudo do raciocínio humano” (CELANI, 2006).

Enquanto a palavra **Computacional** se refere ao processamento lógico de informações, como mencionado por Celani (2006), a palavra **Design** se refere a projeto. Portanto, o Design Computacional “procura desenvolver, por um lado, uma teoria computacional do processo de projeto apoiada nas ciências cognitivas, e, por outro, métodos e aplicações que

⁴ Citação traduzida pela autora, do inglês: “Tools do not exist in isolation. Tools require complementary skills to be effectively used. A computational tool requires cognitive skills.” (Aish, 2013)

permitam o desenvolvimento de projetos com o uso de meios computacionais.” (CELANI, 2008, p. 13).

Apesar desta área da pesquisa de Arquitetura não estar necessariamente ligada às operações realizadas no computador, os avanços nas tecnologias da informação e a criação de computadores cada vez mais potentes, naturalmente, impulsionam o desenvolvimento do Design Computacional, que é beneficiado por máquinas de processamento cada vez mais rápido, e pelo fato, destas mesmas máquinas, atualmente ocuparem um espaço de grande importância nos escritórios de arquitetura do mundo, para auxílio ao projeto.

Considerando a importância da máquina no desenvolvimento de projetos, tanto nas escolas, quanto nos escritórios de arquitetura, o **objetivo** deste capítulo é explorar o campo teórico e prático do Design Computacional com o uso do computador, como um conjunto de métodos e aplicações, que podem ser utilizadas como ferramenta alternativa ao processo de projeto arquitetônico; dando ênfase aos diferentes tipos de ferramentas disponíveis no meio digital, que operam com base nos mencionados métodos – do Design Computacional.

Uma questão importante, a ser ressaltada é que, não são todos os aplicativos e softwares de auxílio a projeto de arquitetura que operam de acordo com os princípios do Design Computacional, apesar de todos eles serem projetados para processar dados referentes a projeto; isto porque o Design Computacional possui métodos bastante específicos de operação. A designação correta, para todos os softwares de auxílio a projeto, é Design Digital; sendo eles de Design Computacional ou não.

Inclusive, muitos arquitetos que trabalham com Design Digital, optam por não trabalhar com softwares que operam sob os métodos do Design Computacional. Há grande resistência, principalmente dentre profissionais mais tradicionais, em relação ao Design Computacional, e um dos motivos é que o Design Computacional, como ferramenta ao processo de projeto, exige que o arquiteto opere através de novas bases metodológicas. O principal desafio é a explicitação do processo de projeto, utilizando métodos cognitivos, tradicionalmente implícitos no processo criativo. O acadêmico Mark Donald Gross, em sua tese de doutorado (1985, p. 1), afirma que nós, arquitetos:

“(...) não acumulamos este saber – como projetar – explicitamente, sendo uma série de procedimentos a seguir, como por exemplo aprendemos a somar, subtrair, e multiplicar. Ao invés disso, nós aprendemos a projetar gradualmente, observando projetistas mais experientes, estudando projetos com qualidade reconhecida, e através da prática e da crítica constantes. Nós aprendemos muitas técnicas, regras métrica, fórmulas e truques, mas nunca um método sistemático. Muitas disciplinas de projeto estão recentemente aproximando-se de uma ‘barreira de complexidade’ [Winograd 73], onde os métodos tradicionais falham em produzir soluções aceitáveis.” (GROSS, 1985, p. 1) ⁵

A pesquisadora e teórica de arquitetura Rivka Oxman, em seu artigo *Theory and design in the first digital age* (2005), reafirma esta característica dos métodos tradicionais de projeto, ao declarar que estes são *“baseados em conhecimento implícito, e não explícito. Tanto o conhecimento necessário para gerar a forma quanto o de avaliá-la não eram formalizados e, muitas vezes, essa falta de sistematização estava associada à intuição*

⁵ Citação traduzida pela autora, do inglês:

“We do not learn this expertise – how to design – explicitly, as a set of procedures to follow, as for example, we learn how to add, subtract, and multiply. Rather, we learn to design gradually, by observing more expert designers, studying designs that are known to be good, and through constant practice and criticism. We learn many techniques, rules-of-thumb, formulae, and tricks, but never a systematic method.” (GROSS, 1985, p. 1)

e à criatividade.” (OXMAN, 2005, p. 243) ⁶

Ambos os autores concordam que o modelo tradicional de projeto, baseado na capacidade criativa do profissional, nem sempre se demonstra como um método eficaz – para projetos complexos. E apontam, como meio de transpor as dificuldades e fragilidades deste método, a necessidade de explicitar o processo promovendo maior racionalização ou sistematização do mesmo. Esta discussão tem sido levantada há tempos, com o intuito de obter resultados mensuráveis sobre a qualidade das soluções propostas.

Para Gross, o desenvolvimento de “*métodos sistemáticos de desenvolvimento de projeto fazem-se necessários para coordenar os esforços de grandes equipes de projetistas, e também para enfrentar problemas mais complexos em projeto.*” (GROSS, 1985, p. 1) ⁷

Enquanto Oxman (2005), em uma publicação duas décadas mais recente, constrói sua análise já considerando os métodos computacionais como a principal estratégia de racionalização do processo projetual:

^{6, 7 e 8} Citações traduzidas pela autora, do inglês:

“Traditional models on design were based on implied, rather than explicit, knowledge. Both generative and evaluative knowledge were not formalized and very often this lack of formalization was associated with intuition and creativity.” (OXMAN, 2005, p. 243)

“More systematic design methods are needed to coordinate the efforts of teams of more than a very few designers, and also to tackle more complex problems.” (GROSS, 1985, p. 1)

“In a computational view of design the explication of cognitive process is based on our ability to formulate, represent, implement and interact with explicit, well-formulated representations of knowledge. In digital design significant processes that have frequently been represented as non-explicit in traditional design models must now be considered explicit. What was an implicit cognitive process in the modeling of design in paper-based media has become explicated due to the nature of computational processes in digital design.” (OXMAN, 2005, p. 243)

“Numa visão computacional do design, a explicação do processo cognitivo baseia-se em nossa capacidade de formular, representar, aplicar e interagir com representações de conhecimento explícitas e bem formuladas. No design digital, processos significativos que frequentemente têm sido representados como não explícitos em modelos de design tradicionais agora devem ser considerados explícitos. O que foi um processo cognitivo implícito na modelagem de design nos meios baseados em papel tornou-se explicitado devido à natureza dos processos computacionais no design digital.” (OXMAN, 2005, p. 243) ⁸

Portanto, podemos perceber que os arquitetos que aceitam o desafio, e transpassam a barreira do processo implícito de projeto, gozam de grandes vantagens ao utilizar softwares do Design Computacional, como por exemplo: **maior controle das informações do projetos** – processo explicitado; maior possibilidade de abstração e **auto-crítica sobre seu processo**, uma vez que é possível visualizá-lo de maneira completa e sequencial; facilidades em trabalhar com **projetos cada vez mais complexos** e com uma equipe maior e heterogênea de profissionais; possibilidade de **desenvolver ferramentas próprias** – com códigos ou até plug-ins – para automatização de trabalhos repetitivos específicos a seu processo pessoal de projeto.

É verdade que a última vantagem citada, sobre desenvolver ferramentas próprias ao processo pessoal de projeto, foi explorada por muitos arquitetos tradicionais. Entretanto, o exercício de explicitar o processo contribui para que esta tarefa seja ainda mais comum, visto que o desenvolvimento de uma ferramenta exige uma abstração e simplificação de um trabalho ou uma etapa de trabalho bastante conhecida. Ao criar uma nova ferramenta o profissional se propõe a visualizar um determinado procedimento de maneira objetiva, para que assim possa inserir um elemento que simplifique o laborioso processo.

A produção da ferramenta envolve um período de racionalização de um conjunto de procedimentos já conhecido.

A barreira de explicitar processo de projeto é intrínseca ao Design Computacional em geral, além desta há a barreira inerente à maioria dos **softwares** de Design Computacional, ou seja, a utilização de seus métodos e aplicações no meio digital: o ato de programar – atividade antes restrita às disciplinas de Tecnologia da Informação e da Matemática, mas que atualmente se torna cada vez mais recorrente na maioria das atividades humanas.

I.1 Design Computacional Digital

Com o intuito de conhecer as principais características das ferramentas computacionais e suas possibilidades quanto aplicações dos métodos de Design Computacional. A autora Rivka Oxman (2005, p. 242) propõe uma classificação de softwares baseados em algumas ideias iniciais, seriam elas: o **tipo de controle** sobre o processo de projeto, e a **natureza da interação** entre projetista e softwares.

No que se refere ao **tipo de controle** sobre o processo de projeto, Oxman os diferencia como: **(a) implícito**, ou não digital; **(b) explícito**, ou digital; **(c) relativa ao ambiente digital**, cuja forma é gerada por meio do processamento lógico de dados. E quanto à **natureza da interação**:

- **(d) Interação da forma livre (não digital)**: o arquiteto interage apenas com a representação por meios não digitais, são os métodos tradicionais de projeto, onde o processo implícito é representado no papel, com desenhos croquis e modelos físicos, sem explicações de seu desenvolvimento.

- **(e) Interação com construção digital:** são os softwares mais simples de desenhos e modelos básicos. O arquiteto monta os modelos e desenhos.
- **(f) Interação com a representação digital gerada por mecanismos:** o projetista interage com uma estrutura de dados através da definição de regras. O arquiteto cria as relações, e a forma é gerada através destas relações.
- **(g) Interação com o ambiente digital:** são os mecanismos de design generativo, onde a partir de métodos existentes, o projetista manipula variáveis e algumas relações, e a representação digital é gerada automaticamente.

Imagem 1:

Esquema genérico: símbolos bordas e ligação.

Fonte: OXMAN, 2005, p. 242.

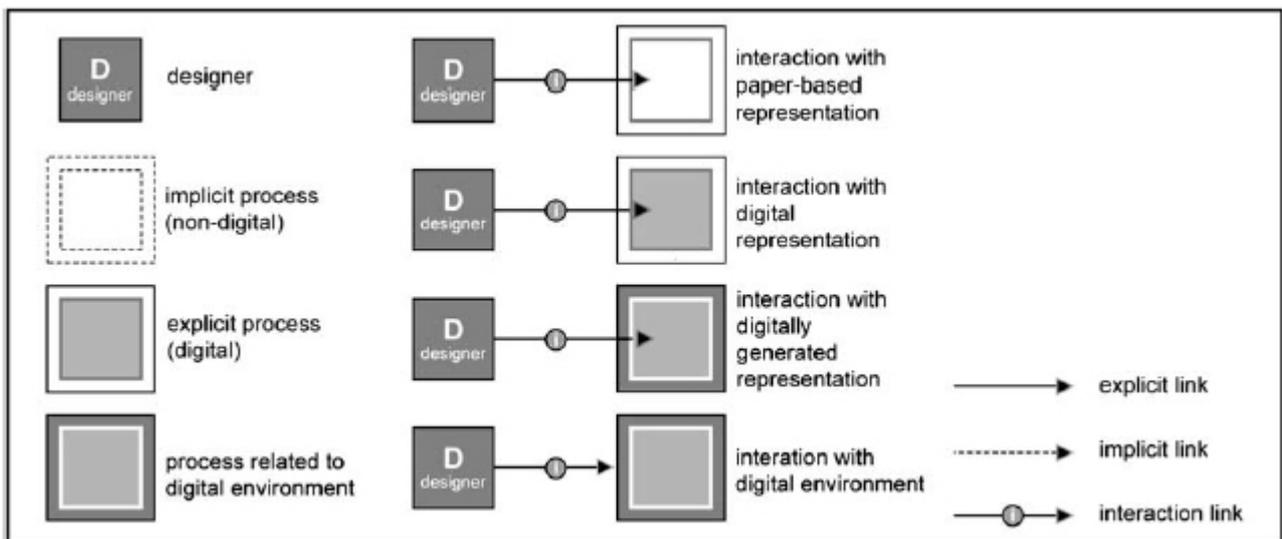
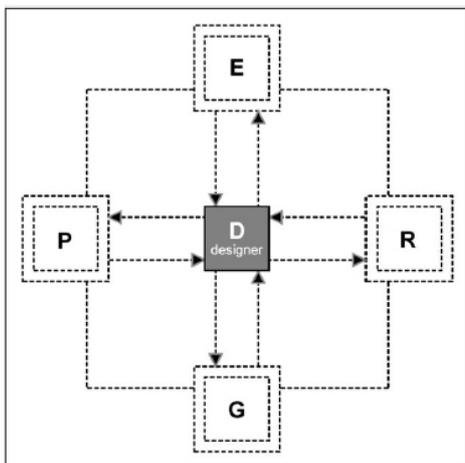


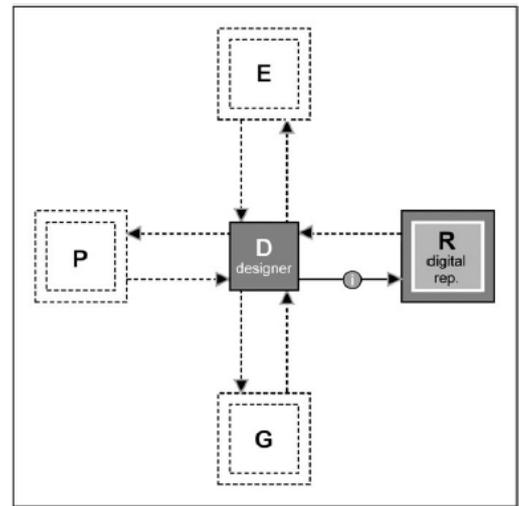
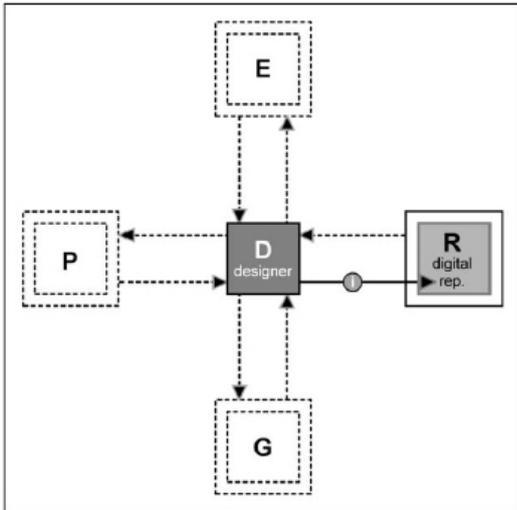
Imagem 2:

Esquema genérico.

Fonte: OXMAN, 2005, p. 241.



A autora (OXMAN, 2005) constrói sua classificação quando relaciona suas premissas de natureza e tipo de interação com quatro componentes (Imagem 2) que, segundo ela, representam atividades básicas dos processos tradicionais, são eles: Representação (R), Avaliação (E = *Evaluation*), Performance (P) e Geração da Forma (G).



Desta maneira, Oxman sugere cinco classes e outras subclasses de softwares, são elas:

- **CAD (imagem 3):** São as primeiras gerações de softwares, baseadas principalmente nos processos tradicionais. As atividades de Performance (P) e Geração da Forma (G) ocorrem todas de maneira implícita. A explicitação do processo ocorre na atividade de Representação (R), podendo ou não suceder também na atividade de Avaliação (E = Evaluation). Suas subclasses são:

- CAD descritivo;
- CAD gerador de avaliação;
- CAD descritivo com processos digitais com dupla direção.

- **Formativa (imagem 4):** “a centralidade do conceito tradicional da representação baseada no papel não é mais uma concepção válida para explicar o pensamento e o processo metodológico.” “Em certos processos formativos as implicações formais do conceito de representação são negativas e improdutivas.” (Oxman, 2005, p. 249). A interação com o ambiente digital ocorre apenas na atividade de Representação (R), as demais são implícitas. Suas subclasses são:

- Formativa Topológica;
- Formativa Associativa;
- Formativa baseada na ação.

Imagem 3:

Classe de software CAD.

Fonte: OXMAN, 2005, p. 247.

Imagem 4:

Classe de software Formativa.

Fonte: OXMAN, 2005, p. 250.

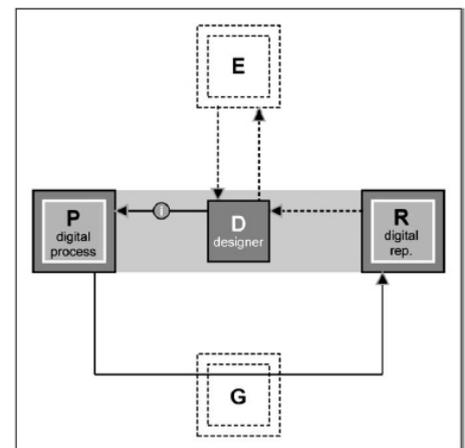


Imagem 7:

Subclasse Formativa baseada na performance.

Fonte: OXMAN, 2005, p. 258.

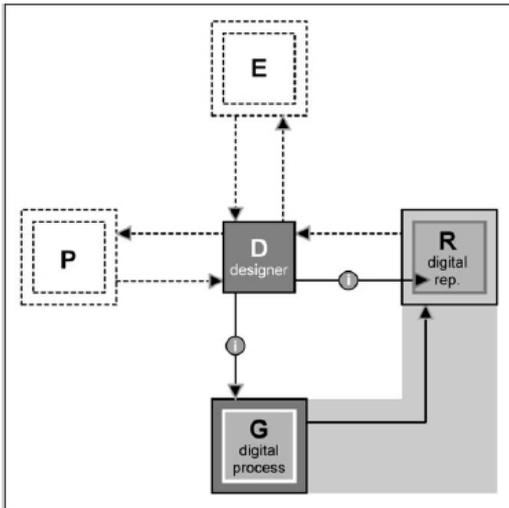
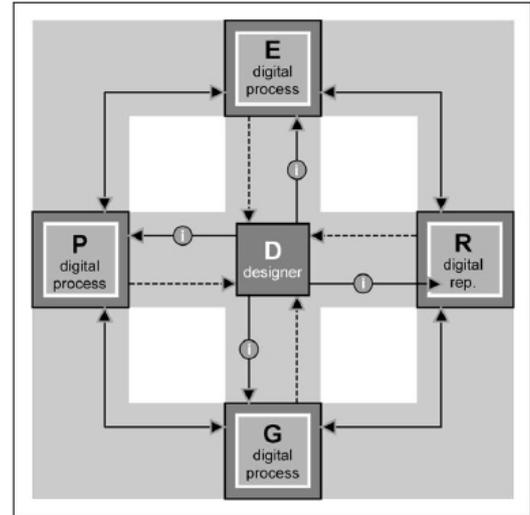


Imagem 5:

Classe de software Generativa.
Fonte: OXMAN, 2005, p. 255.

Imagem 6:

Classe de software Composta.
Fonte: OXMAN, 2005, p. 261.



- **Generativa (Imagem 5):** Qualidades formais são predefinidas através da formulação de processos generativos de mecanismos computacionais (OXMAN, 2005, p. 254). A interação com o ambiente digital ocorre na atividade de Geração da Forma (G), e a Representação (R) da forma é gerada automaticamente; as demais atividades são implícitas.

- Generativa baseada na transformação gramatical;
- Generativa Evolucionária.

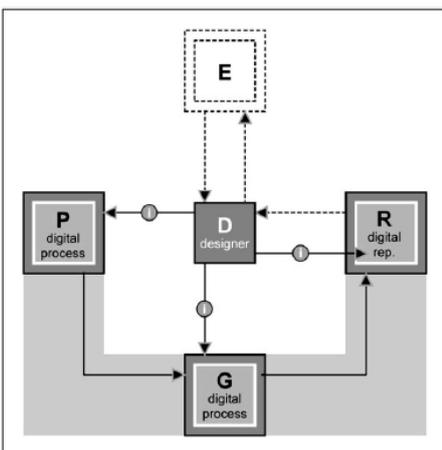


Imagem 8:

Subclasse Generativa baseada na performance.
Fonte: OXMAN, 2005, p. 259.

- **Performativa:** A geração da forma é baseado em um determinado desempenho pretendido. Por isso, a explicitação ocorre na atividade de Performance (P), e a Representação (R) da forma é gerada automaticamente. Nesta classificação a atividade de Geração da Forma (G) pode ou não ocorrer através da interação com o ambiente digital; as demais atividades são implícitas.

- Formativa baseada na performance (Imagem 7);
- Generativa baseada na performance (Imagem 8).

- **Composta (Imagem 6):** Para Rivka Oxman (2005, p. 260) representa uma classe futura paradigmática. Trata-se de composições dos processos anteriormente descritos, com explicitação de todas as quatro atividades consideradas, concomitantemente: Representação (R), Avaliação (E = Evaluation), Performance (P) e Geração da Forma (G).



Como o interesse deste trabalho é o aprofundamento sobre as aplicações do Design Computacional, proponho, a partir da classificação de softwares de Design Digital de Oxman, uma diferenciação das ferramentas que possam ser reconhecidas como operadoras dos métodos do Design Computacional; são eles cuja a natureza das interações ocorram com: a representação digital gerada por mecanismos e o ambiente digital. Desta forma, as classes a serem aprofundadas são: Formativa, Generativa e Performativa.

Imagem 9:

Design Digital e Computacional.

Quadro demonstrativo evidenciando foco da pesquisa.

Fonte: autora.

A **classe CAD** pode ser considerada pertencente ao grupo dos softwares que operam sob métodos do Design Computacional, quando se utilizam AutoLisp, sua interface de programação, entretanto, este é um uso pouco recorrente na maioria dos escritórios de arquitetura brasileiros; que em geral limita-se à descrição dada. A **classe Composta** também pertence ao grupo dos softwares que operam sob métodos do Design Computacional, entretanto, como esta classificação não é bem definida pela própria autora, e por este motivo não participará do escopo de aprofundamento deste trabalho.

I.1.1 CLASSE FORMATIVA

Segundo Oxman (2005), nos softwares classificados como formativos o usuário interage com o ambiente digital apenas na atividade de Representação (R), as demais são implícitas. Neste trabalho, esta é a primeira das classes, das apresentadas por Oxman, compreendida como operante dos métodos do Design Computacional, uma vez que a autora afirma que “a centralidade do conceito tradicional da representação baseada no papel não é mais uma concepção válida para explicar o pensamento e o processo metodológico.” “Em certos processos formativos as implicações formais do conceito de representação são negativas e improdutivas.” (Oxman, 2005, p. 249)⁹. Isso porque, esta classe de softwares não sugere que o profissional foque suas atenções à forma final do objeto arquitetônico, mas na lógica

⁹ Citação traduzida pela autora, do inglês: “In digital design the centrality of traditional concepts of paper-based representation are no longer valid conceptions for explicating the thinking and methodological process associated with digital design. Furthermore, in certain formation process of digital design the formal implications of the concept of representation are negative and unproductive.” (OXMAN, 2005, p. 249)

formativa e associações geométricas, pois a forma emergirá como resultados dessas interações.

I.1.1.1 Subclasse Formativa Topológica

“A reconsideração da topologia e da geometria não-euclidiana como base formal para o design implementado no design digital contribuiu para a exploração de novas possibilidades formais. Topologia é o estudo da estrutura relacional dos objetos e não da geometria. É o estudo das propriedades de objetos que não mudam quando transformações homeomórficas são aplicadas. Portanto, a estrutura topológica pode ser definida em uma variedade de formas geometricamente complexas. Emmer, em Mathland: From Flatland of Hypersurfaces (Emmer, 2004) investigou o papel da topologia como um novo processo de formação em design.

Estas tendências teóricas de design foram apoiadas por novas tecnologias de software que abrem um universo de possibilidades manipulativas geométricas baseadas em topologias interativas. Em tais mídias de design digital, as coordenadas estáticas de formas e formas de mídia digital convencional são substituídas por construções dinâmicas computacionais, incluindo superfícies topológicas, ou hiper-superfícies. Além disso, as interações com modificadores digitais (nurbs, b-splines racionais não uniformes) ou operações de modelagem como ‘lofting’ estão abrindo novas tecnologias para a criação e manipulação altamente interativa de formas geométricas complexas no design.”

(OXMAN, 2005, p. 252) ¹⁰

Imagem 10:

*Estudos de topologia em objeto em transformação. Imagem produzida no software Rhinoceros
Fonte: autora.*



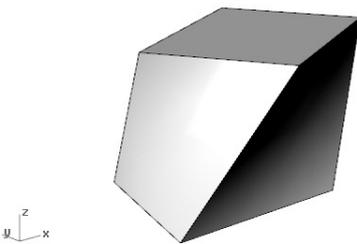
¹⁰ Citação traduzida pela autora, do inglês: “The reconsideration of topology and non-Euclidean geometry as a formal basis for design implemented in digital design has contributed to the exploration of new formal possibilities. Topology is the study of the relational structure of objects rather than of geometry. It is the study of those properties of objects that do not change when homeomorphic transformations are applied. Therefore topological structure can be defined in a variety of geometrically complex forms. Emmer, in Mathland: from Flatland of Hypersurfaces (Emmer, 2004) has investigated the role of topology as a new formation process in design.

These design theoretical tendencies have been supported by new software technologies that have opened up a universe of interactive topologically based geometric manipulative possibilities. In such digital design media the static coordinates of shapes and forms of conventional digital media are replaced by computational dynamic constructs including topological surfaces, or Hyper-surfaces. Furthermore, interactions with digital modifiers (nurbs, non-uniform rational b-splines), or modeling operations such as ‘lofting’ are opening new technologies for the creation and highly interactive manipulation of complex geometrical shapes in design.” (OXMAN, 2005, p. 252)

Em outras palavras, Oxman afirma que com a descoberta e o desenvolvimento dos estudos de topologia, as formas que antes eram descritas através de coordenadas estáticas, passaram a ser descritas através de relações internas, e transformações modificadoras.

A **imagem 10** apresenta três objetos, que demonstram uma sucessão de transformações. Ao primeiro objeto, o cubo, foi transformado provocando uma inclinação no volume, representado pelo segundo objeto, que por sua vez sofre uma torção, onde foi gerado o terceiro objeto.

Os três objetos mantêm a mesma quantidade de faces, arestas e vértices, que se correlacionam da mesma maneira. Apesar de se tratar de formas bastante diferentes ao tentarmos descrevê-las através das coordenadas estáticas, é possível identificar muitas semelhanças, quando descrevemos de acordo com suas transformações.



I.1.1.2 Subclasse Formativa Associativa: o paramétrico

De acordo com a descrição de Rivka Oxman (2005, p. 252), a subclasse Formativa Associativa é baseada nas técnicas de design paramétrico que exploram as geometrias associativas.

Essa associação geométrica que a autora se refere, é um poderoso artifício para estabelecer interdependência entre diversos objetos que compõem a forma final, automatizando o processo formativo. Múltiplas variações formais podem ser facilmente produzidas com a simples atribuição de novos valores às variáveis, enquanto se mantém relações e condições iniciais.

Através de condições, parâmetros e variáveis, o profissional pode gerar pequenas ferramentas lógicas, que são etapas de seu processo particular de criação, como regras que este utiliza com determinada constância em seus projetos. Tais ferramentas podem ser consultadas e utilizadas sempre que o profissional achar necessário, sem repetir seu processo completo, desde o início.

Segundo a visão do arquiteto Branko Kolarevic (2013), através desta técnica – paramétrica – os arquitetos projetam “não a forma específica do edifício, mas um conjunto de princípios codificados digitalmente como uma sequência de equações paramétricas pelas quais instâncias específicas do projeto podem ser geradas, simplificando a variação dos valores dos parâmetros.” (KOLAREVIC, 2013, p. 51) ¹¹.

“Nessa morfose digital, um sistema de regras, relações e / ou restrições generativas é definido primeiro (em formação) e seus controles interativos são especificados; a estrutura resultante de interdependências é frequentemente dada alguma forma genérica (formação), que é então submetida aos processos de deformação ou de transformação, impulsionados por essas mesmas relações e regras embutidas no próprio sistema.” (KOLAREVIC, 2013, p. 51) ¹²

Kolarevic considera o uso da técnica uma mudança profunda no projeto arquitetônico, iniciada no final dos anos 80 e início

¹¹ e ¹² Citações traduzidas pela autora, do inglês:

“the architects were designing not the specific shape of the building but a set of principles encoded digitally as a sequence of parametric equations by which specific instances of the design can be generated by simply varying the values of parameters.” (KOLAREVIC, 2013, p. 51)

“In this digital morphosis, a system of generated rules, relations and/or constraints is defined first (in-formation), and its interactive controls specified; the resulting structure of independences is often given some generic form (formation), which is then subjected to the processes of de-formation or trans-formation, driven by those very same relations and rules embedded within the system itself.” (KOLAREVIC, 2013, p. 51)

dos anos 90, onde pela primeira vez na história, os arquitetos projetavam um conjunto de princípios digitalmente, ao invés de projetar a forma. Esta afirmação se confirma pela consolidação deste processo em meio digital, pois de acordo com William Mitchell, em seu livro *A lógica da arquitetura* (2008), há evidências claras que muitos arquitetos utilizavam sequências de regras projetuais para produção de projetos, de maneira explícita, em diversos momentos históricos, sem portanto a utilização das ferramentas digitais.

A exemplo de Palladio, em *Quattro Libri d'Architettura* (1570), o arquiteto descreve a maneira como introduzia regras que balizavam seu processo projetual:

“ E apesar de a variedade e as coisas novas agradarem a todos, elas não devem contudo ser feitas de maneira a ir contra os preceitos da arte, e contra o que dita a razão; por isso vemos que os antigos usavam a variedade, porém sem jamais deixar de lado as universais e necessárias regras da arte, como será mostrado em meu livro de antiguidades.’

Em seguida, eram apresentadas regras prescritivas, como os exemplos abaixo, relativos ao desenho de vilas:

‘Os cômodos devem ser distribuídos a cada lado da entrada e do hall; e deve-se observar que aqueles do lado direito devem corresponder àqueles do lado esquerdo, de maneira que a construção seja a mesma de um lado e do outro...

As janelas do lado direito devem corresponder às do esquerdo, e as que estão em cima devem corresponder às que estão sob elas, de modo que o vazio fique sobre o vazio, e o cheio sobre o cheio, e que elas fiquem frente a frente, de modo que estando de um lado da casa possamos ver o outro, o que resulta simultaneamente em beleza e ar fresco no verão, além de outras vantagens.’ “ (PALLADIO, 1570 apud MITCHELL, 2008, p. 145)

Considerando então, que a parametrização trata-se da retomada de práticas antigas, que explicitavam o processo de geração da forma através da prescrição de regras simples, a novidade está relacionada à introdução da ferramenta computacional como potencializadora do processo, uma vez que o computador permite a inserção de uma quantidade maior de regras, a serem processadas em curto período de tempo.

O arquiteto Neil Leach, em seu artigo *Parametrics Explained* (2014), prefere uma descrição das práticas paramétricas diretamente associada com a ferramenta computacional:

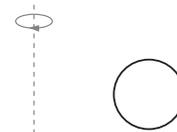
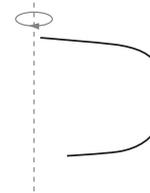
“Literalmente significa trabalhar dentro de parâmetros de um intervalo definido. Dentro do campo específico do design contemporâneo, no entanto, refere-se amplamente à utilização de software de modelagem paramétrica. Em contraste com os pacotes de software baseados em objetos geométricos de referência, o software paramétrico vincula dimensões e parâmetros à geometria, permitindo o ajuste incremental de uma peça que afeta a montagem inteira. Por exemplo, quando um ponto dentro de uma curva é reposicionado, a curva inteira se realinha. As operações que são facilitadas são de adaptação, mistura e suavização. Portanto, é útil não apenas na modelagem de formas individuais, mas também em todo o campo do planejamento urbano associativo.”
(LEACH, 2014, p. 2)¹³

O autor aponta o desenho curvilíneo como uma característica marcante da parametrização, sendo um processo caracterizado pela manipulação formal, com maior controle sobre o processo de projeto; entretanto, o software paramétrico não abre um novo vocabulário de forma (LEACH, 2014, p. 2).

Portanto, podemos considerar como técnicas paramétricas, aquelas que utilizam a ferramenta computacional em processo de projeto, que explicita as regras projetuais e criem relações entre as partes para geração da forma, através de um sistema de condicionantes que possa ser manipulado pela interação manual dos parâmetros, para geração de novas instâncias formais, onde sua representação formal pode ser visualizada imediatamente, pela interface gráfica do software.

A seguir, será demonstrada uma aplicação prática simples do sistema lógico de condicionantes, na produção de um

CURVA PERFIL B



SUPERFÍCIE A

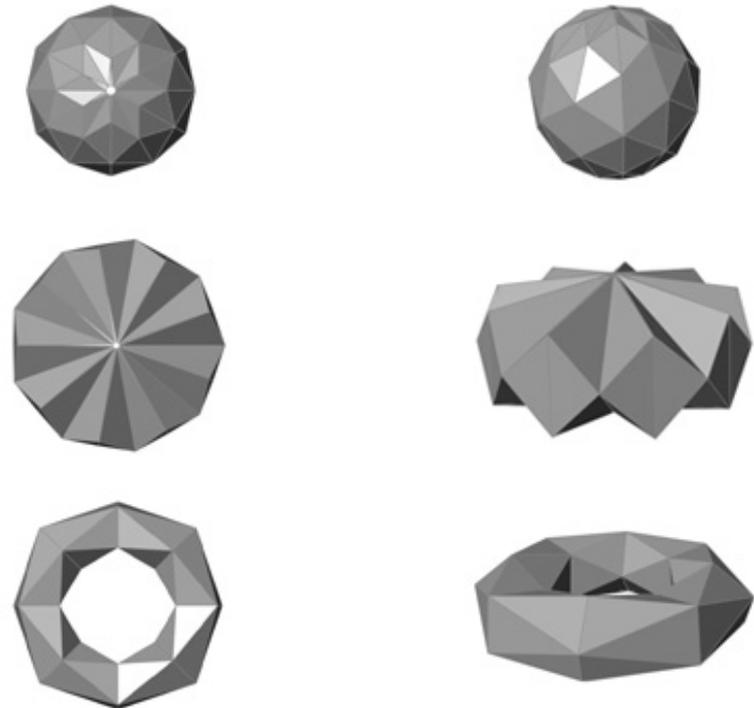


¹³ Citação traduzida pela autora, do inglês: *“Literally it means working within parameters of a defined range. Within the specific field of contemporary design, however, it refers broadly to the utilization of parametric modeling software. In contrast to standard software packages based on datum geometric objects, parametric software links dimensions and parameters to geometry thereby allowing for the incremental adjustment of a part which then affects the whole assembly. For example, as a point within a curve is repositioned the whole curve comes to realign itself. The operations that it facilitates are adaptation, blending and smoothing. It is therefore useful not only in modeling individual forms but also in the whole field of associative urban planning.”* (LEACH, 2014, p. 2)

Imagem 11:

Exemplo de variação formal com Formativa Associativa: cúpulas geradas através de um mesmo sistema de condicionantes, com manipulação dos parâmetros de curva de perfil e divisão radial e vertical.

Fonte: autora.

DIVISÃO VERTICAL Y**DIVISÃO RADIAL X**

Uma **superfície de revolução A**, construída através de uma **curva de perfil B** rotacionada ao redor de um eixo, será subdividida radialmente em **X** superfícies triangulares, e verticalmente em **Y** superfícies triangulares (Imagem 11).

Sendo **A** resultado da revolução de **B**, a **superfície A** está condicionada geometricamente a **curva de perfil B**. A superfície A será sempre resultado de B, e para manipulá-la o usuário manipula B.

Através do sistema de condicionantes, com a mesma lógica, é possível variar os parâmetros **B**, **X** e **Y** para criar uma variedade infinita de soluções.

desenho associativo que utiliza o desenho paramétrico para gerar a forma.

O sistema de condicionantes é um meio de utilização das técnicas paramétricas para inserir as regras de maneira explícita. Nestas demonstrações serão utilizados exemplos produzidos pela autora, utilizando os softwares Rhinoceros (versão 5.11) e Grasshopper (versão 0.9.0076).

Aplicações digitais com subclasse formativa associativa

Para a construção de uma cúpula gerada a partir de técnicas paramétricas, o processo pode ocorrer da seguinte maneira:

CASCA ESTRUTURAL

Um outro exemplo de transformação utilizando ferramentas desta subclasse, que utiliza o sistema de condicionantes é a produção a seguinte casca estrutural (Imagem 12).

Fixa-se ao plano XY algumas arestas (P) de uma superfície (W), e essa é deformada após ser submetida à uma força vetorial (Z) contrária à gravidade, gerando uma casca (V), em uma transformação geométrica que está condicionada as alterações das variáveis (P), (W) e (Z).

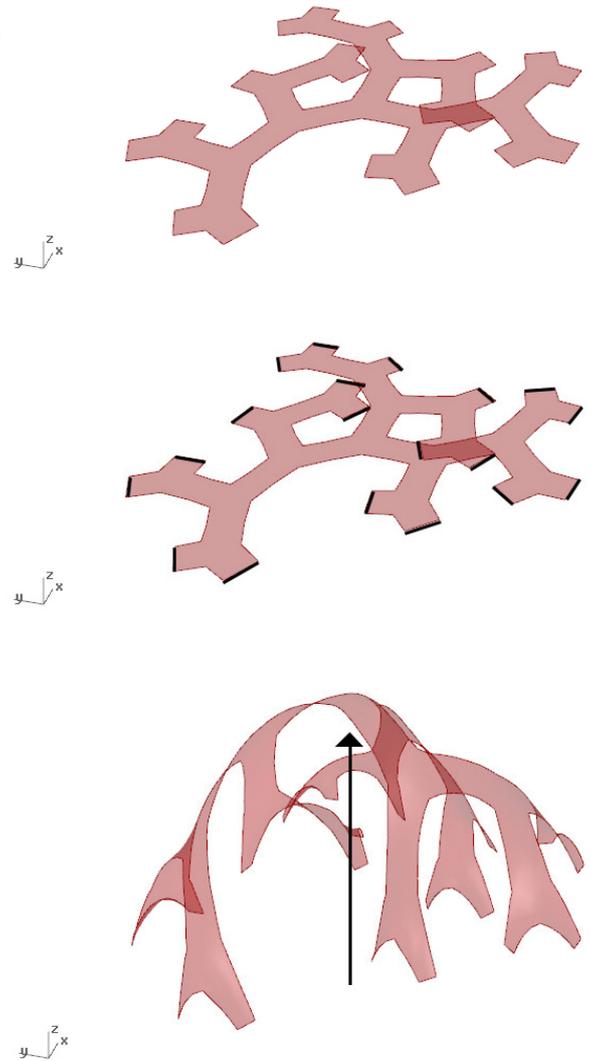
Não existem novidades neste método, durante o processo de projeto convencional, o arquiteto sempre utilizou regras durante o processo de projeto, como por exemplo: A existência de suportes nos intervalos de x metros; ou a estipulação de uma quantidade mínima de horas que um determinado ambiente deve receber iluminação natural por dia; ou ainda, a largura mínima da cozinha deve ter.

A maneira de interagir com o projeto digital, que utiliza as técnicas paramétricas, é saber explicitar todas estas regras, ou condicionantes durante o processo de projeto, de modo que os condicionamentos que o projetista julga ser os mais importantes estejam declarados logo no início, para que estes restrinjam os seguintes, em uma ordem hierárquica.

Imagem 12:

Exemplo de geração formal de superfície em utilizando classe Formativa Associativa: elaboração de sistema de condicionantes.

Fonte: autora.



I.1.1.3 Subclasse Formativa Baseada na Ação

Segundo Oxman (2005), nesta subclasse de softwares, a distinção entre forma e formativo se torna ainda mais significativa, ou seja, a diferença de criar a arquitetura pensando

na forma final – como no modelo baseado no papel, e criar lógicas associativas onde a forma final irá emergir como resultado, são mais evidentes. “*Campos de força dinâmica e emissão de partículas contribuem para novo potencial em processos dinâmicos para geração da forma*” (OXMAN, 2005, p. 253)¹⁴. A autora complementa que o projetista não interage diretamente com o meio representativo da forma, mas com a estrutura interativa do meio para geração da forma.

Aplicações com subclasse formativa baseada na ação

Como exemplo de aplicação, podemos observar o projeto das torres Al Bahar do escritório Aedas Architects (Imagem 13), situadas em Abu Dhabi, possuem as chamadas “fachadas responsivas”, que respondem ou se alteram atreladas à alguma mudança no meio onde estão inseridas. Tais mudanças podem

Imagem 13:

Foto das torres Al Bahar, projeto de Aedas Architects, em Abu Dhabi.
Fonte: <https://www.archdaily.com/270592/al-bahar-towers-responsive-facade-aedas>.



¹⁴ Citação traduzida pela autora, do inglês: “*Dynamic force field and particle emission have contributed to new potential for dynamic processes of form generation*” (OXMAN, 2005, p. 253)

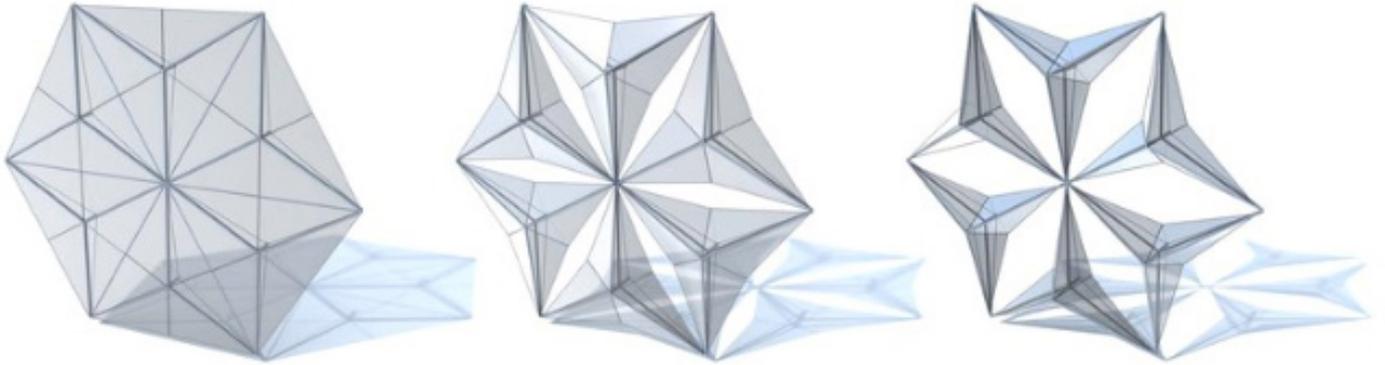


Imagem 14:

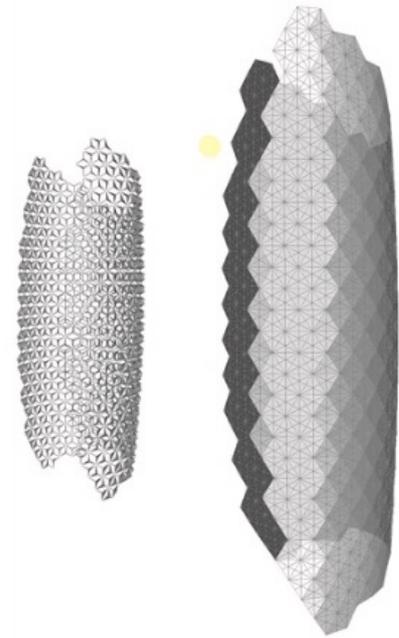
Modelo do padrão de triângulos com alteração formal baseada na ação (movimento do sol).

Fonte: <https://www.archdaily.com/270592/al-bahar-towers-responsive-facade-aedas>.

Imagem 15:

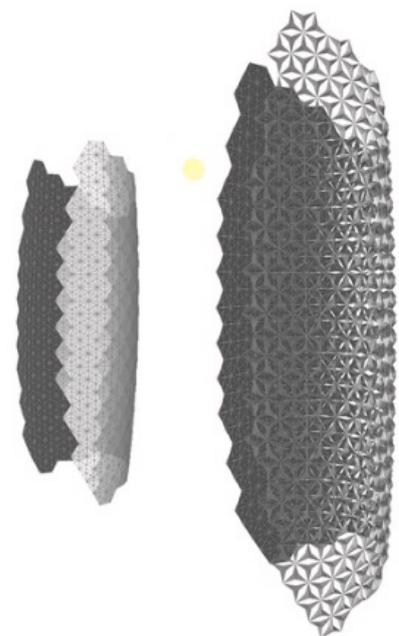
Modelos da fachada das torres Al Bahar, demonstrando alteração formal baseada na ação (movimento do sol).

Fonte: <https://www.archdaily.com/270592/al-bahar-towers-responsive-facade-aedas>.



ocorrer sobre diversos aspectos, inclusive sob o aspecto formal, como no estudo de caso.

As construções são exemplos de geração ou instanciamento da forma baseadas na ação, ou seja, a forma é produto da condição do meio, em constante alteração. Usando técnicas paramétricas para a geometria dos painéis de fachadas responsivas, a equipe foi capaz de simular sua operação em resposta à exposição solar e mudanças nos ângulos de incidência durante os diferentes dias do ano. A fachada é constituída por uma cortina com moldura independente, a dois metros do lado externo do prédio (Imagem 15). O padrão triangular (Imagem 14) é programado para responder ao movimento do sol, como forma de reduzir o ganho solar e o brilho. À noite, todas as telas serão fechadas. A medida que o sol muda de posição novos instanciamentos formais da fachada são produzidos.



I.1.2 CLASSE GENERATIVA

Oxman (2005, p. 254) define esta classe de softwares através da provisão de mecanismos computacionais por processos generativos formalizados. São eles: **Gramática da Forma e Computação Evolucionária**.

Em comparação com a classe formativa, que sugere a construção de relações geométricas e topológicas onde se interage com o sistema através da manipulação de valores e variáveis, nesta classe o projetista interage com mecanismos pré-formulados. Trata-se de métodos bastante estruturados do Design Computacional, que a seguir serão demonstrados.

I.1.2.1 Subclasse Generativa Baseada na Transformação Gramatical: Gramática da Forma

A transformação gramatical ou Gramática da Forma é um mecanismo generativo baseado em regras de composição formal (OXMAN, 2005, p. 255). Segundo Oxman, além da forma em si, também existem aplicações baseadas em regras de composição espacial à qualidades tectônicas e materiais. O projetista interage com as regras compositivas e objetos, não diretamente com a forma final.

Este método conhecido como Gramática da Forma (do inglês shape grammar) foi desenvolvido por George Stiny e James Gips (1972), no início da década de 70. “Ele consiste em um sistema de geração de formas baseado em regras e tem sua origem no sistema de produção do matemático Emil Post (1943)

e na gramática generativa do linguista Noam Chomsky (1957).” (CELANI, 2006, p. 182). Stiny e Gips (1972) desenvolveram um sistema que consiste em um conjunto de regras por meio das quais podem-se gerar seqüências formais por meio de substituições de um símbolo inicial. Baseado em formas geométricas e transformações euclidianas:

“As principais operações utilizadas nas regras de uma gramática da forma são a translação, a rotação, o espelhamento e a roto-translação. Além disso, é possível também adicionar e remover formas e aplicar a transformação escalar, para que a mesma regra possa ser aplicada a figuras semelhantes, porém de diferentes tamanhos.” (CELANI, 2006, p. 182)

De acordo com Celani (2006), o mecanismo da Gramática da Forma é estruturado a partir dos seguintes elementos:

Vocabulário de formas (Imagem 16): sendo necessário definir um conjunto finito de formas primitivas que farão parte da gramática. Essas formas podem ser bi ou tridimensionais.

Relações espaciais (Imagem 17): São estabelecidas as combinações espaciais desejadas entre as formas primitivas do vocabulário.

Regras (Imagem 18): A partir das relações espaciais, são definidas regras de transformação do tipo $A \gg B$ (ao encontrar A, substitua por B). Essas regras podem ser do tipo aditivas ou subtrativas.

A forma inicial: para dar início à aplicação das regras, é necessário selecionar uma forma inicial, pertencente ao vocabulário de formas.

Imagem 16:

Exemplo de **vocabulário de formas** em Gramática da Forma.

Fonte: CELANI, 2006.



Imagem 17:

Exemplo de **relações espaciais** em Gramática da Forma.

Fonte: CELANI, 2006.

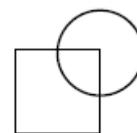
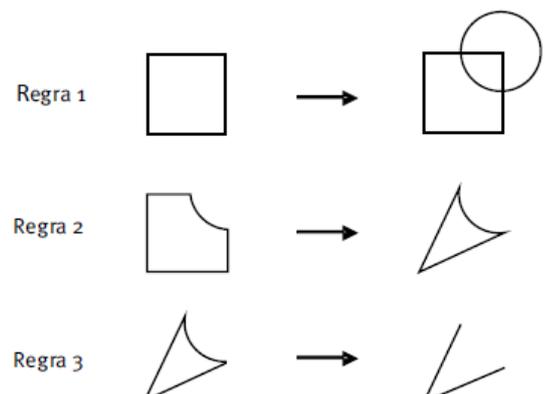


Imagem 18:

Exemplo de **regras** em Gramática da Forma.

Fonte: CELANI, 2006.



Aplicação com subclasse generativa baseada na transformação gramatical

O pavilhão do arquiteto Toyo Ito (2002), para o Serpentine Gallery, em Londres (Imagem 19), é exemplo de como a forma pode resultar de sucessivas substituições. O padrão de cortes no cubo foi concebido em planta, bidimensionalmente. No processo de investigação da forma do pavilhão, o exemplo foi reproduzido pela autora com o auxílio dos softwares Rhinoceros (versão 5.11) e Grasshopper (versão 0.9.0076). O estudo tomou por base o artigo *Long form and algorithm* (2011) do engenheiro arquiteto Daniel Bosia (Imagem 20), ex-integrante da empresa responsável pela execução do pavilhão, a ARUP.

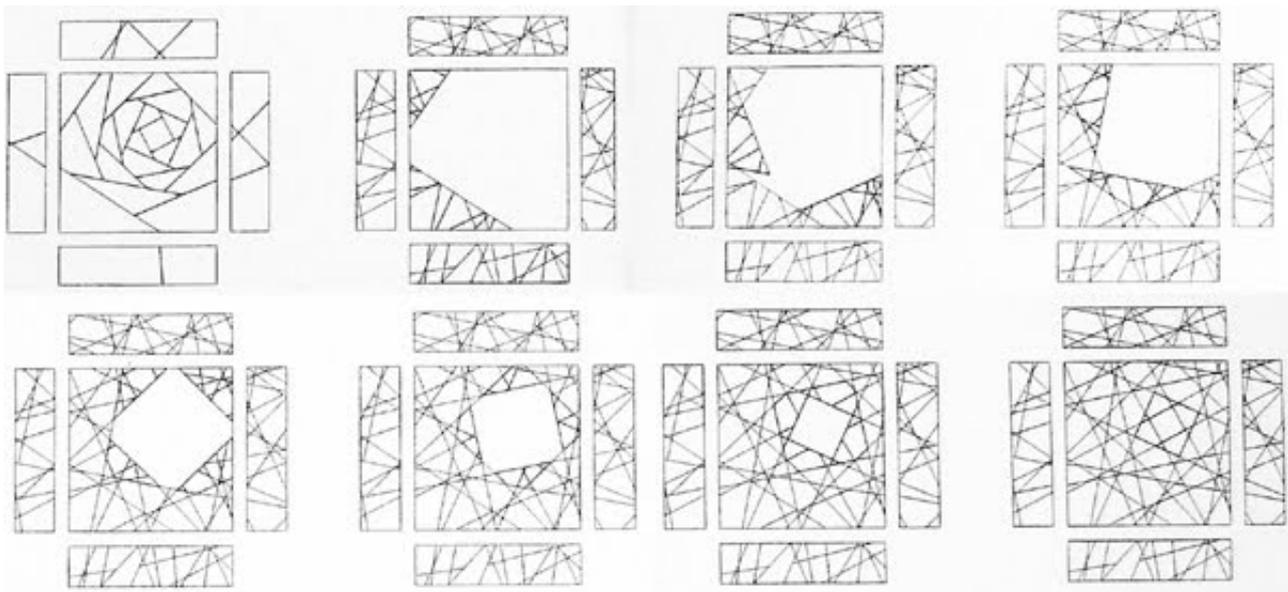
Assim, iniciou-se a interação com o mecanismo através do preenchimento das etapas exigidas pelo método da Gramática da Forma, segundo descrito por Celani (2006):

Imagem 19:

Foto do pavilhão Serpentine Gallery, 2002 - Toyo Ito & ARUP.

Fonte: www.serpentinegalleries.org.





O **vocabulário** da forma é constituído por quadrados, pontos e linhas retas.

As **relações espaciais** foram estudadas de modo que fosse produzida uma sequência de quadrados com dupla transformação: de rotação e de escala.

A partir dos estudos das relações espaciais foram produzidas as quatro **regras**: uma regra de locação de oito pontos no perímetro do quadrado (Imagem 21, regra R1); duas regras para conexão dos pontos, resultando na subdivisão da figura inicial, gerando novos quadrados (Imagem 21, regras R2 e R3); e uma

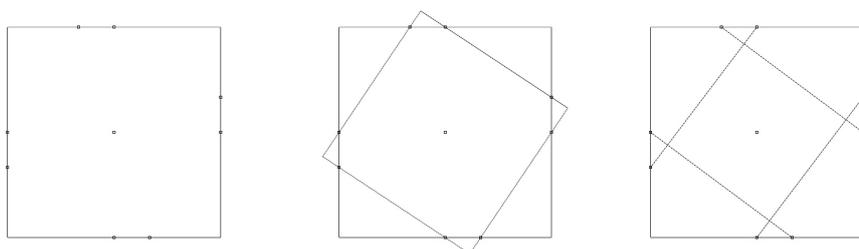


Imagem 21:

Desenvolvimento de regras de Gramática da forma para estudo da geração formal do Pavilhão Serpentine Gallery, 2002.

R1, R2 e R3.

Fonte: autora.

Imagem 20:

Imagens de desenvolvimento do Pavilhão Serpentine Gallery, 2002 - Toyo Ito & ARUP.

Fonte: BOSIA, 2011.

quarta regra de prolongamento de linhas até o limite da figura (regra R4):

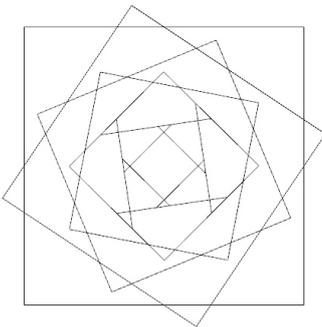
A **forma inicial** é um quadrado.

A sequência de regra aplicada foi (Imagens 22 e 23): R1 > R2 > R1 > R2 > R1 > R2 > R1 > R2 > R1 > R3 > R1 > R3 > R4

Imagem 22:

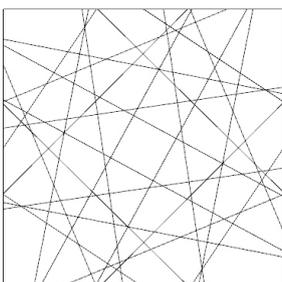
Aplicação de regras (R1, R2 e R3) em estudo da geração formal do Pavilhão Serpentine Gallery, 2002.

Fonte: autora.

**Imagem 23:**

Aplicação da regra de finalização (R4) em estudo da geração formal do Pavilhão Serpentine Gallery, 2002.

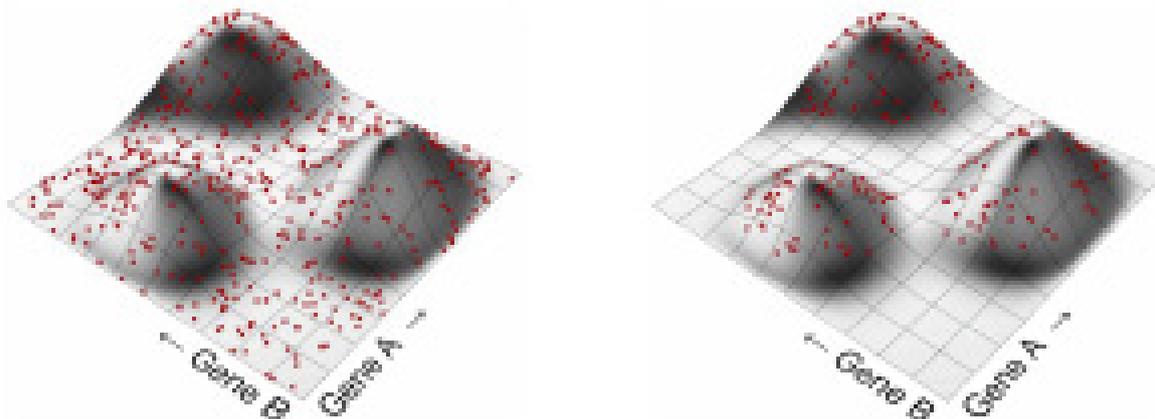
Fonte: autora.

**I.1.2.2 Subclasse Generativa Evolutiva: Algoritmo Genético**

De acordo com a descrição de Oxman (2005, p. 256), as técnicas evolucionárias são parte de uma longa tradição da pesquisa que explora mecanismos de geração da forma. A autora afirma que algumas dessas técnicas tem se tornado a principal ferramenta em muitas pesquisas.

Apesar de estar representada como uma única subclasse, as técnicas evolucionárias, ou os algoritmos evolutivos, ou ainda, a computação evolucionária são uma mesma categoria, que abrangem diversas metodologias (muito parecidas, mas com algumas especificidades), como por exemplo seus quatro principais tipos: os Algoritmos Genéticos, a Programação Evolutiva, as Estratégias de Evolução e a Programação Genética.

No livro *Evolutionary Design by Computers*, Bentley (1999) apresenta estes quatro principais tipos de algoritmos evolutivos mencionados, e todos eles se baseiam na busca de uma solução para um determinado problema, onde o projetista interage com um mecanismo de um dos tipos de Algoritmos



Evolutivos de sua escolha. Estes fazem referência às teorias evolutivas de Darwin; com o argumento de que a evolução natural é o melhor, mais original e antigo sistema existente para evoluir qualquer estrutura.

Bentley (1999) declara que os tipos algoritmos evolutivos são responsáveis pela geração de **variações**, e dispõem tais variações em um **espaço de busca**, onde cada ponto neste espaço representa uma **solução** (Imagem 24). Cada resultado – ou solução – é avaliado em relação a uma **função fitness**, que pode ser definida como uma descrição matemática de um objetivo que determina se aquela geração foi boa ou ruim, e se ela deve ‘evoluir’ ou ‘morrer’ (Imagem 25). Este processo se repete até que o sistema atinja seu objetivo ou seja interrompido pelo operador do sistema (Imagens 26 e 27). É requisito básico de todos os tipos de algoritmos evolutivos essa orientação para direcionar a evolução para melhores áreas do espaço de busca. A solução mais apropriada é a que tiver o resultado numérico, em função da equação *fitness*, mais próximo de zero. O zero representa a solução perfeita.

Imagem 24:

Espaço de busca com soluções variadas representadas por pontos.
 Fonte: <http://www.grasshopper3d.com/profiles/blogs/evolutionary-principles>.

Imagem 25:

Espaço de busca com soluções selecionadas através da função fitness, representada por relevos no espaço de busca.
 Fonte: <http://www.grasshopper3d.com/profiles/blogs/evolutionary-principles>.

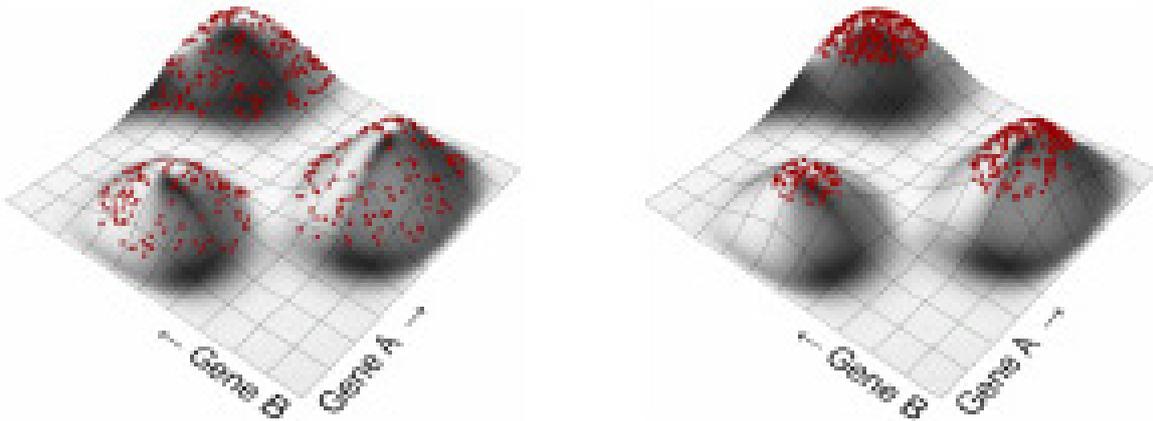


Imagem 26:

Espaço de busca com nova geração de soluções com herança representadas por pontos.

Fonte: <http://www.grasshopper3d.com/profiles/blogs/evolutionary-principles>.

Imagem 27:

Espaço de busca com soluções refinadas através da função fitness.

Fonte: <http://www.grasshopper3d.com/profiles/blogs/evolutionary-principles>.

Na teoria Universal Darwinista, para que a evolução ocorra, alguns critérios devem ser preenchidos, são eles: **reprodução, herança, variação e seleção**. Nos Algoritmos Evolutivos a **reprodução** de indivíduos é simulada por meio de clonagem, recombinação ou mutação garantindo **herança** com **variação**. E todos eles utilizam algum método de **seleção**.

Além dos critérios de evolução, Peter Bentley demonstra outros três importantes requisitos dos algoritmos evolutivos: **inicialização, avaliação e término**. A solução de **inicialização** deve ser dada com uma estrutura fixa, mas com valores parametrizáveis, para que haja recombinação dos mesmos e geração de novas soluções. Assim, as soluções geradas passam por uma **avaliação** que determinará se a solução é digna de sobreviver e se reproduzir, ou de **término**.

Os Algoritmos Genéticos (John Holland, 1973-1975), a Programação Evolutiva (Lawrence Fogel, 1963), as Estratégias de Evolução (Ingo Rechenberg, 1973) e a Programação Genética (John Koza, 1992), são os quatro principais tipos de Algoritmos Evolutivos apresentados por Peter Bentley; eles

possuem algumas diferenças quanto ao espaço de busca, ao processo de variação e herança, mas a estrutura geral é a mesma. Entretanto, o Algoritmo Genético é o sistema mais utilizado atualmente no campo da otimização de Arquitetura, e por este motivo será o método aprofundado no desenvolvimento deste trabalho.

...

Neil Leach (2014, p. 3), em sua definição sobre algoritmos, declara que estes são solucionadores de problemas, e sua utilização *“explora a capacidade do computador de operar como máquina de busca, e executar tarefas que consumiriam tempo excessivo. Por isso, presta-se a otimização e outras tarefas além das limitações do padrão de projeto por condicionantes.”*¹⁵

Entretanto, há diferentes visões mais restritivas sobre a questão, o arquiteto Fabian Scheurer (2013, p. 189), por exemplo, afirma que os sistemas generativos não estão resolvendo problemas. Segundo ele os computadores são confundidos por serem inteligentes, mas na verdade estes são incrivelmente rápidos e embaraçosamente obedientes; isso porque o usuário é obrigado a declarar tudo com muito mais detalhe do que para uma criança de três anos de idades, por isso são incapazes de lidar com ambiguidade. Não havendo espaço para interpretação ou criatividade.

“Uma vez iniciado, ele está apenas deterministicamente percorrendo uma estrada asfaltada, escolhendo direções em cada encruzilhada com base em regras predefinidas e continuando até atingir um sinal de paralização ou uma tela azul de erro” (SCHEURER, 2013, p. 189)¹⁶. Isso se estende aos

algoritmos evolutivos, que se demonstram inábeis de encontrar soluções fora de seu espaço de solução.

“Quando estão bem montados, descrevem o problema a resolver e uma estratégia que leva a uma solução. Muitas dessas estratégias baseiam-se na capacidade de analisar rapidamente espaços de solução incrivelmente vastos e encontrar bons candidatos que preenchem determinados critérios de adequação. Para conseguir isso em tempo razoável, abordagens probabilísticas e / ou dinâmicas são úteis e muitas vezes levam a resultados que surpreendem o público. Principalmente porque são um pouco fora das sugestões reducionistas que um engenheiro típico apresentaria. Mas olhar diferente não significa necessariamente que eles estão funcionando melhor. E, ao contrário de um algoritmo, um bom engenheiro geralmente tem a capacidade de realmente resolver problemas pensando fora da caixa.” (SCHEURER, 2013, p. 189-190) ¹⁷

O algoritmo exige que o profissional, ao mesmo tempo, descreva o problema e sua estratégia de solução. Para Fabian Scheurer (2013) isso é a demonstração de que talvez o problema não seja exatamente um problema, visto que o próprio usuário enxerga a solução e declara os meios para solução.

¹⁵, ¹⁶ e ¹⁷ Citações traduzidas pela autora, do inglês:

“Algorithmic design exploit the capacity of the computer to operate as a search engine, and perform tasks that would otherwise consume inordinate time. It therefore lends itself to optimization and other tasks beyond the limitation of standard design constraints.” (LEACH, 2014, p. 3)

“Once started, it is just deterministically running down a paved road, choosing directions at every crossroads based on predefined rules and continuing until it hits a stop sign or a blue screen” (SCHEURER, 2013, p. 189)

“When they are well assembled, they describe the problem to resolve and a strategy that leads to a solution. Many of these strategies are based on the ability to quickly scan incredibly vast solution spaces and find good candidates that fulfil certain fitness criteria. To achieve this in reasonable time, probabilistic and/or dynamic approaches are useful and often lead to results that surprise the audience. Mainly because they are a bit off the reductionist suggestions a typical engineer would come up with. But looking different does not necessarily mean that they are working better. And, in contrast to an algorithm, a good engineer often has the ability to actually solve problems by thinking outside the box.” (SCHEURER, 2013, p. 189-190).

Portanto, podemos considerar como uso do algoritmos evolutivos na busca da forma arquitetônica, um método que utiliza a ferramenta computacional para escolher uma ou mais soluções que atendam a determinada expectativa do profissional de arquitetura. Cabe ao profissional determinar: um objetivo, através de uma função matemática objetiva – função fitness; uma forma com possibilidades de variação; e um espaço de busca, determinado pelas penalidades. É através dessas definições que o profissional interage com os resultados, que irá gerar instâncias formais de maneira automática, e sua representação formal será visualizada imediatamente, pela interface gráfica do software.

A partir do contraste de visões apresentadas, o otimismo de Leach contra o pessimismo de Scheurer, em relação ao mecanismo dos Algoritmos Genéticos, foram gerados alguns posicionamentos críticos em relação à técnica.

A capacidade que o computador tem em combinar uma maior quantidade de variáveis pode ser bastante benéfica ao projeto, uma vez que o arquiteto precise testar muitas variantes antes de decidir qual caminho projetual seguir.

Quando o projetista se propõe a resolver um problema espacial, este é submetido a abstrair o problema para traçar estratégias de solução e obter respostas, este processo ocorre tanto nos modelos tradicionais de trabalho quanto nos modelos não tradicionais. Portanto a crítica de Scheurer de que o problema não é um problema quando há estratégia de solução, parece gratuita, visto que todos os problemas deixam de ser um

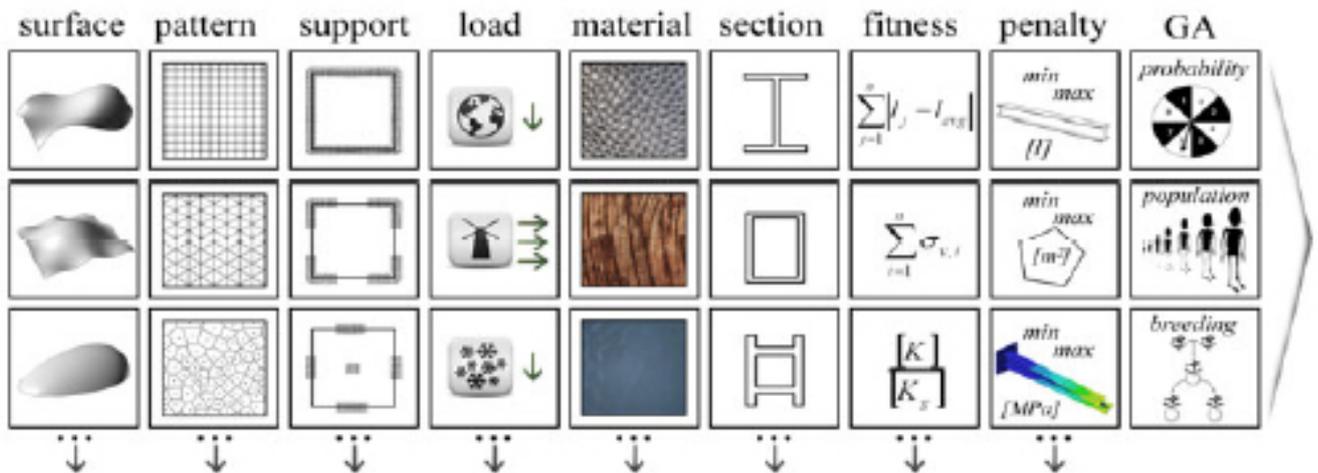
problema depois que se encontra a solução. Os processos computacionais não tiram a responsabilidade do arquiteto quanto a solucionar os problemas espaciais, estes são apenas um instrumento de auxílio.

Aplicação com subclasse generativa evolutiva

Os arquitetos Milos Dimcic e Jan Knippers, no artigo *Integration of FEM, NURBS and Genetic Algorithm in Free-Form Grid Shell Design* (2011), na tentativa de desenvolver um plugin que opere no mecanismo dos Algoritmos Genéticos, explicitam o passo a passo do processo de otimização estrutural de uma forma livre (Imagem 28), que serviu de apoio à experimentação prática do mecanismo:

“Portanto, um plug-in foi desenvolvido para que o usuário possa: 1. Escolher a superfície sobre a qual o padrão será gerado, 2. Escolher o padrão básico (...), 3. Definir uma combinação de suportes (...), 4. Definir uma combinação de cargas (...), 5. Definir as propriedades do material, 6. Definir a seção transversal dos membros estruturais, 7. Definir a função objetiva (...), 8. Definir uma ou mais funções de penalidade (por exemplo, limite o comprimento de um membro, limite o tamanho de um polígono, limite a tensão gerada em um membro, etc.), 9. Definir os parâmetros de GAs (por exemplo, probabilidade de cruzamento e de mutação, número de indivíduos, número de gerações, etc). Cada uma dessas configurações (Fig. 1) pode ser facilmente expandida e redefinida. Quando eles são escolhidos, o processo de otimização começa e o algoritmo converge para a melhor solução dentro dessa combinação de configurações de entrada.” (DIMICIC & KNIPPERS, 2011, p. 97-98) ¹⁸

¹⁸ Citação traduzida pela autora, do inglês: “Therefore a plug-in was developed so that the user can: 1. Choose the surface over which the grid will be generated, 2. Choose the basic pattern of the grid (...), 3. Set a support combination (...), 4. Set a load combination (...), 5. Set material properties, 6. Set cross-section of structural members, 7. Define fitness function (...), 8. Define one or more penalty functions (e.g. limit the length of a member, limit the size of a polygon, limit the stress generated in one member, etc.), 9. Set GAs parameters (e. G. Cross-over and mutation probability, number of individuals, number of generations, etc.). Each one of these settings (Fig. 1) can be easily expanded and redefined. When they are chosen the optimization process begins and the algorithm converge toward the best solution for that combination of input settings.” (DIMICIC & KNIPPERS, 2011, p. 97-98)



Com o crescimento no interesse deste método entre as fases iniciais do projeto, foram desenvolvidos alguns softwares com objetivos pré-definidos, com o intuito de facilitar o uso dos Algoritmos Genéticos para os profissionais de arquitetura, que não pretendem se comprometer com a descrição de funções matemáticas, como a função fitness e outras especificidades do material e do mecanismo. Para estas demonstrações será utilizado um exemplo produzido pela autora, com o uso dos softwares Rhinoceros (versão 5.11), Grasshopper (versão 0.9.0076) e Karamba (versão 1.2.2).

As etapas de inserção dos elementos (Imagem 28) são muito parecidas com as especificadas por Dimcic e Knippers (2011), lembrando:

Escolha da superfície (1), definição de uma reticula base (2), determinação dos apoios (3), combinação de cargas que irão incidir sobre o objeto (4), propriedade do material (5), secção

Imagem 28:

Etapas de preenchimento dos elementos necessários à otimização estrutural com Algoritmos Genéticos: superfície, padrão reticula, suportes, cargas, material, secção estrutural, função objetiva, penalidades e definições do mecanismo. Fonte: DIMCIC & KNIPPERS, 2011.

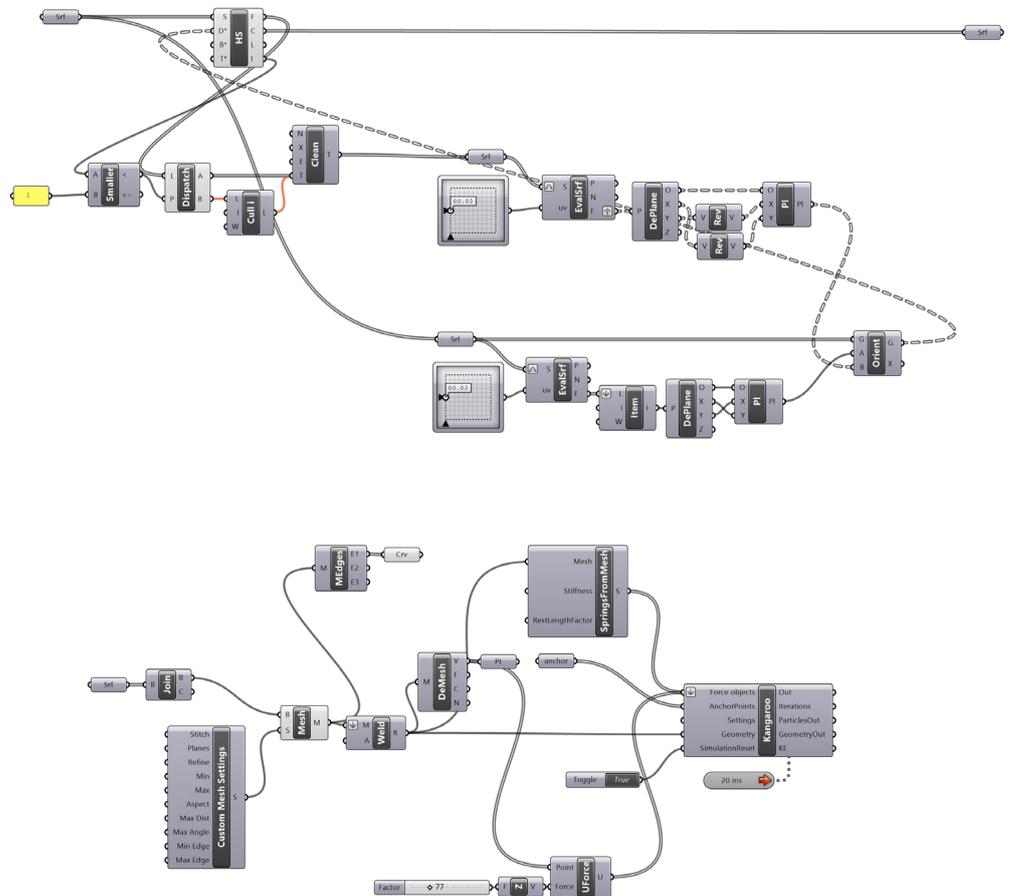
estrutural (6), definição da função fitness (7), penalidades (8) e determinação dos parâmetros do algoritmo genético (9).

O intuito deste experimento é produzir a otimização do padrão da retícula de uma estrutura, para que esta esteja alinhada ao fluxo de forças de descarga sobre os apoios. Por este motivo analisou-se a superfície e seus esforços, e em seguida foi definida uma retícula otimizada. O uso de um software específico para estrutura permitiu uma análise mais complexa da forma.

A proposta é que a forma da superfície seja concebida de maneira que mantenha o equilíbrio entre forças de tração e compressão, ao suportar apenas a força gravitacional.

Imagem 29:

Código desenvolvido com Grasshopper e Karamba, para geração da superfície inicial a ser inserida em mecanismo de Algoritmos Genéticos para otimização estrutural (modelo Generativo Evolutivo).
Fonte: autora.



1. Uma superfície inicial plana, sofreu uma deformação através de uma força vertical de sentido oposto à gravidade. A superfície foi desenvolvida através do Rhinoceros (versão 5.11) e trazida para o ambiente do Grasshopper (versão 0.9.0076);
2. Inicialmente, foi necessário estipular uma retícula inicial, e para isso utilizou-se uma subdivisão de quatro lados;
3. Seguindo o processo, foi determinado que todos os pontos da superfície que estavam presos ao plano XY seriam considerados apoios, sem movimento de rotação e translação para os três eixos;
4. Para as cargas, apenas a condicionante universal da força gravitacional foi simulada;
5. A etapa de inserção de material não foi preenchida neste primeiro momento, já que estamos tratando de uma superfície contínua, e para este tipo de estrutura será mantida a configuração padrão oferecida pelo plugin, chapa contínua de aço S235;
6. Assim como na etapa anterior a seção estrutural da superfície foi mantida de acordo com a pré-definição de três milímetros de espessura;
7. A função fitness escolhida foi minimizar os esforços de Von Mises (fluxo de descarga dos esforços estruturais).

Com os dados inseridos, o software gera os cálculos e aponta os desempenhos da superfície. Indicando linhas de fluxo da descarga dos esforços estruturais sobre os apoios. As linhas de fluxo de descarga foram transformadas em estruturas tubulares,

Imagem 30:

Modelo gerado do código da imagem anterior para geração da superfície inicial a ser inserida em mecanismo de Algoritmos Genéticos para otimização estrutural (Classe Generativa Evolutiva).

Fonte: autora.

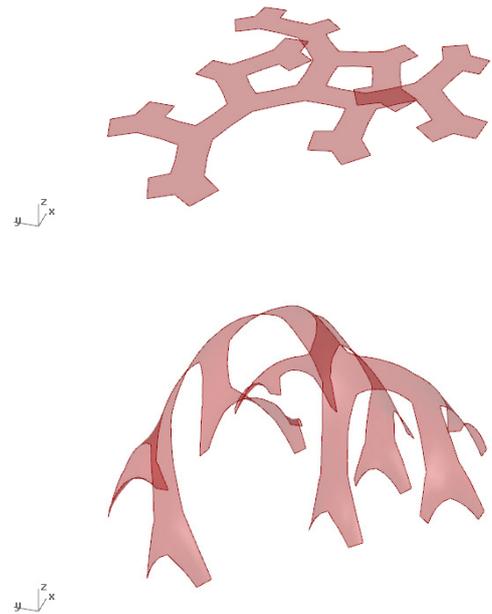


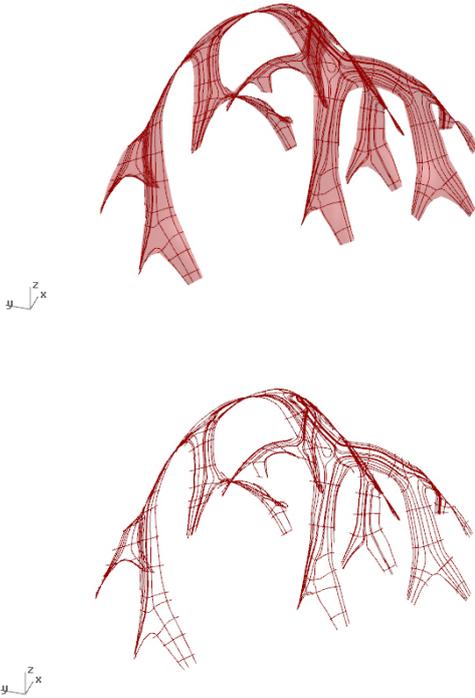
Imagem 32:

Código desenvolvido com Grasshopper e Karamba, gerador da forma final baseada na performance, condicionada ao desempenho estrutural de distribuição do fluxo de cargas (Classe Generativa Evolutiva).

Fonte: autora.

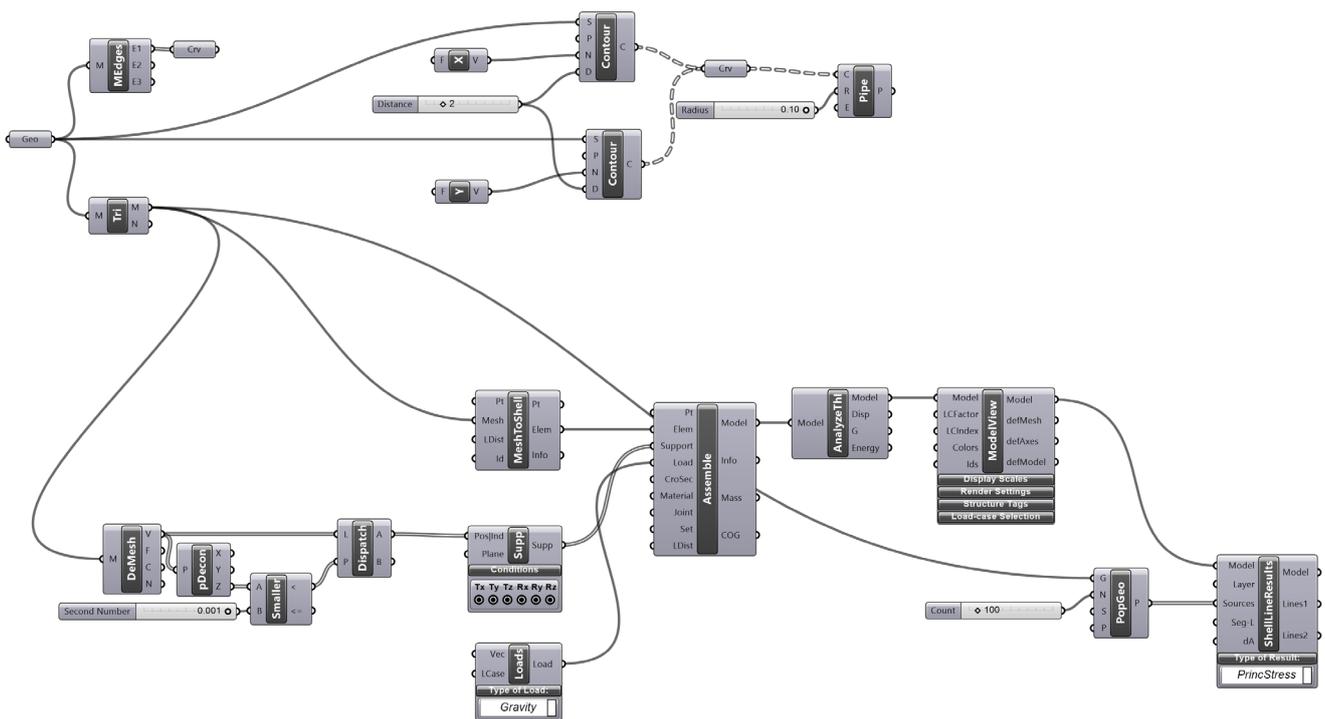
Imagem 31:

Modelo gerado baseado na performance, de estrutura condicionada ao desempenho estrutural de distribuição do fluxo de cargas (Classe Generativa Evolutiva).
Fonte: autora.



sendo considerados os novos elementos estruturais, desta maneira a forma estrutural foi definida a partir da otimização.

Infelizmente não são produzidos tantos softwares de otimização acústica como os de interesse estrutural, mas a partir da bibliografia disponível e dos exemplos demonstrados, é possível produzir experimentos acústicos com os algoritmos genéticos. Como diretriz de desenvolvimento podemos abstrair as etapas demonstradas por Dimcic e Knippers da seguinte maneira: As etapas (1) a (6) são destinadas às informações necessárias para estudo da estrutura, e variam de acordo com o aspecto técnico (estrutura, acústica, térmica e etc.), sendo que pelo menos uma das etapas será objeto de otimização; as demais etapas, de (7) a (9), são comuns ao sistema. No capítulo três a experimentação dos Algoritmos Genéticos para otimização acústica, será demonstrada, discutida e aprofundada.



capítulo II: ACÚSTICA ARQUITETÔNICA

Este capítulo tem por objetivo gerar um senso crítico sobre o tema da performance técnica, com foco na acústica arquitetônica, para isto serão apresentados: primeiramente, a relação entre acústica e a forma arquitetônica; e posteriormente, visões críticas sobre o impacto que a performance sobre a forma.

II.1 Relação entre Acústica e Forma Arquitetônica.

Durante o aprofundamento teórico sobre relação entre acústica e forma, partiu-se da concepção de que a sonoridade da sala é resultante da combinação do som direto e do som refletido. As superfícies que encerram o espaço tem influência na distribuição do som refletido, assim a forma do espaço pode gerar boa complementação ao som direto ou distorções na recepção sonora.

A relação entre a forma arquitetônica e a acústica pode ser verificada ao longo da história. Os gregos descobriram a eficiência da distribuição da platéia em formas semicirculares em aclive, pelo aproveitamento da topografia; os romanos criaram o anfiteatro; na Idade Média, com a expansão do Cristianismo, o que melhor retratava as funções acústicas eram

as igrejas, entretanto, durante séculos a influência acústica da forma arquitetônica era identificada de forma empírica, e os projetos de teatro eram baseados na reprodução de modelos que apresentavam bom desempenho acústico. *“Cientificamente, o valor da acústica dos ambientes foi comprovado no século XX.”* (BRAGANÇA et al, 2012, p. 22). Desde então, os arquitetos trabalhavam de forma mais ou menos empírica, buscando reproduzir bons exemplos, padrões de salas que apresentaram bom desempenho acústico. Foi a partir do estudo de Wallace C. Sabine, correlacionando o volume, os materiais os princípios acústicos se desenvolveram rapidamente.

Hoje, o decorrente desenvolvimento de ferramentas computacionais avançadas de geração e construção da forma, permitem ao profissional explorar e associar o repertório da soluções formais aos resultados técnicos esperados. Para isso, do profissional é exigida a adoção de novas bases metodológicas em projeto, e por consequência uma necessidade de adequação e discussão sobre a inserção das questões acústicas no processo projeto.

Por meio de revisão bibliográfica, serão apresentados os conceitos básico da acústica, e algumas discussões sobre condicionamento sonoro de espaços, através de estudos que abordem o aspecto geométrico-acústico, com foco no tema da reflexão sonora.

¹⁹ *Citação traduzida pela autora, do inglês: “Sound can be defined as a wave motion in air or other elastic media (stimulus) or as that excitation of hearing mechanism that results in the perception of sound (sensation). Which definition applies depends on whether the approach is physical or psychophysical. The type of problem dictates the approach to sound. If the interest is in the disturbance in air created by a loudspeaker, it is a problem in physics. If the interest is how it sounds to a person near the loudspeaker, psychophysical methods must be used. Because this book addresses acoustics in relation to people, both aspects of sounds will be treated.”*

II.1.1 CONCEITOS BÁSICOS DA ACÚSTICA

“O som pode ser definido como um movimento de onda no ar ou outro meio elástico (estímulo) ou como aquela excitação do mecanismo de audição que resulta na percepção do som (sensação). Qual definição se aplica depende se a abordagem é física ou psicofísica. O tipo de problema determina a abordagem ao som. Se o interesse está na perturbação no ar criada por um alto-falante, é um problema na física. Se o interesse é como soa para uma pessoa perto do alto-falante, métodos psicofísicos devem ser usados” (EVEREST, 2001, p. 1).¹⁹

As vibrações descritas são “oscilações de moléculas do meio de propagação, em torno de sua posição de equilíbrio” (CARVALHO, B., 1967, p. 25), as moléculas ou partículas não se deslocam, elas oscilam, em relação à seu ponto de equilíbrio, provocando a vibração das partículas vizinhas, transmitindo energia sonora, e resultando na propagação. A **imagem 33** demonstra uma representação gráfica da oscilação das partículas gerando áreas de compressão e rarefação do meio elástico – o ar (A), que por convenção é representada através da linha senoidal, que demonstra a diferença de pressão em relação ao tempo (B).

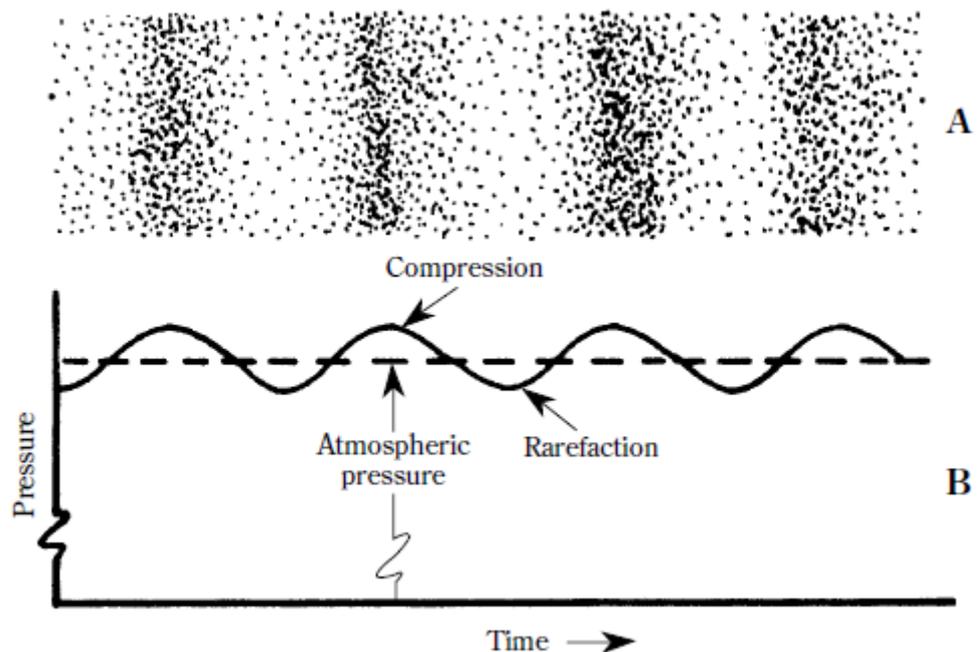


Imagem 33:

(A) visualização instantânea das regiões de compressão e rarefação da onda sonora no ar.

(B) A região de compressão está ligeiramente à cima, e a de rarefação ligeiramente à baixo da pressão atmosférica.

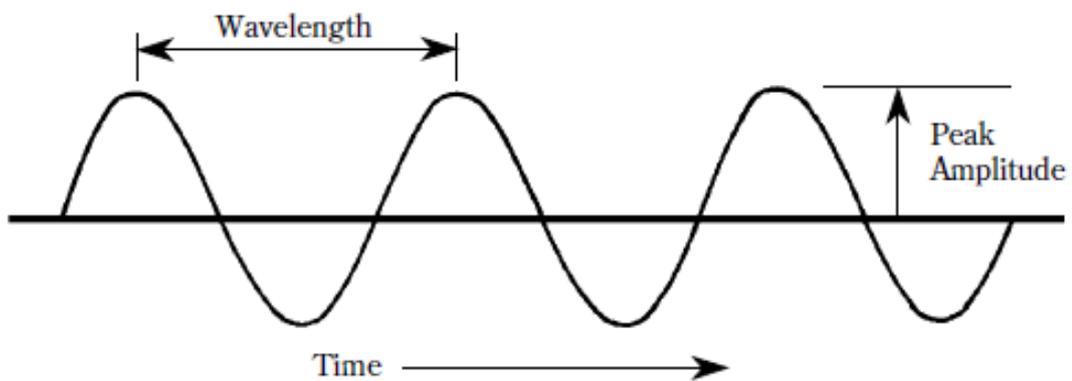
Fonte: EVEREST, 2001.

Estes estímulos resultam nas ondas sonoras (Imagem 34), que como uma dança apresentam pressão e rarefação entre as moléculas, determinando o deslocamento da partícula em relação ao seu centro de equilíbrio, a diferença de pressão do momento de maior rarefação e maior compressão é denominado de amplitude. E o deslocamento percorrido por uma partícula segundo um ciclo completo de pressão-rarefação é denominado comprimento de onda.

Imagem 34:

Comprimento de onda é a distância que a onda se propaga no intervalo de tempo necessário que a onda completa um ciclo.

Fonte: EVEREST, 2001.



O número de vezes que a molécula completa o ciclo de compressão e rarefação em um determinado intervalo de tempo, é denominado frequência, e o intervalo de tempo necessário para que um som complete um ciclo é denominado período. Normalmente a frequência é medida em Hertz, que representa o número de ciclos por segundo (c.p.s). As baixas frequências tem menor número de oscilações temporais, correspondem aos sons mais graves, enquanto as frequências altas, com maior número de oscilações temporais, aos sons mais agudos. As vibrações que não são captadas pelo ouvido humano são as frequências fora do limite audível de 20 a 20.000 Hz.

Energia e intensidade sonora

Segundo a descrição na ABNT NBR 16313:2014, a potência sonora é a quantidade de energia sonora emitida ou recebida por unidade de tempo, expressa em watts (W).

“A potência necessária para que uma fonte produza um som é muito pequena (mínima audível da ordem de 10-12 W), ou seja, para que o ouvido perceba o som, a flutuação (compressão-rarefação) da pressão do ar é também muito pequena (mínima da ordem de $2 \times 10^{-5} \text{ N/m}^2$ ou 0,0002 mb), se considerada a grandeza da pressão atmosférica (1.000 mb ao nível do mar)” (BRAGANÇA et al, 2012, p. 29).

Entretanto, a faixa de pressão audível é bastante larga.

Enquanto o limiar de audição corresponde a $0,00002 \text{ N/m}^2$, o limiar da dor é de 200 N/m^2 , uma escala de difícil trabalhabilidade.

Para facilitar o manuseio, a escala de pressão é substituída pela escala logarítmica do decibel (dB), onde o limiar de audição é igual à zero decibel e o limiar de dor é igual à 120 decibéis. Desta maneira, a variação de um bilhão de W/m^2 na escala de intensidade, é substituído por 120 dB.

Assim, ao invés de trabalhar com intensidade sonora ou pressão sonora, utiliza-se o decibel para medir o nível de intensidade sonora (NIS) e o nível de pressão sonora (NPS). O nível de intensidade sonora (NIS), em decibel, corresponde a uma intensidade sonora (I), descrita em W/m^2 ; e o nível de pressão sonora (NPS), em decibel, corresponde a uma pressão sonora (P), em Pa.

A partir da fonte a propagação sonora ocorre em todas as direções (Imagem 35), isso significa que o som é emitido sob a forma de ondas esféricas concêntricas, tendo a fonte sonora como centro comum (CARVALHO, B., 1967, p. 12). Entretanto, existe uma tendência de as fontes sonoras irradiarem mais energia em determinada direção que em outras, esta tendência define a direcionalidade da fonte. Tomando-se como exemplo a voz humana, enquanto as médias e baixas frequências distribuem-se mais uniformemente, com ângulos mais abertos em relação à fonte, as altas tendem a se concentrar no eixo longitudinal da fonte (BRAGANÇA et al, 2012, p. 28).

A existência da direcionalidade explica a perda de inteligibilidade do som a medida que o receptor se afasta do eixo longitudinal, por este motivo os ambientes com fonte sonora de interesse, como auditórios devem considerar a direcionalidade para definir o traçado da platéia, já que a partir do eixo o padrão sonoro é mantido à 45° para cada lado.

Isto significa que uma pessoa “falando normalmente em recinto fechado, será ouvido no sentido da emissão até 30 metros de distância. Para os lados até cerca de 13 metros e para trás 10 metros” (CARVALHO, B., 1967, p. 24). Pode-se estimar o comprimento de uma sala em trinta metros sem o uso de amplificador.

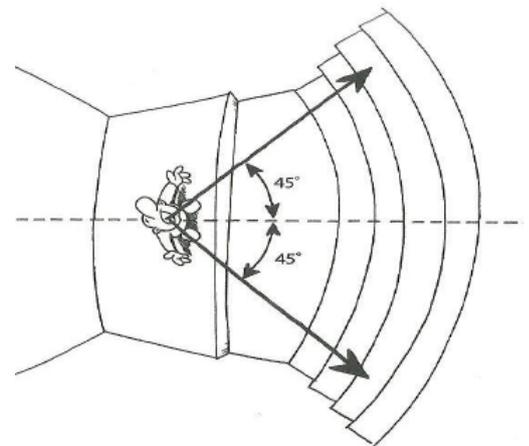
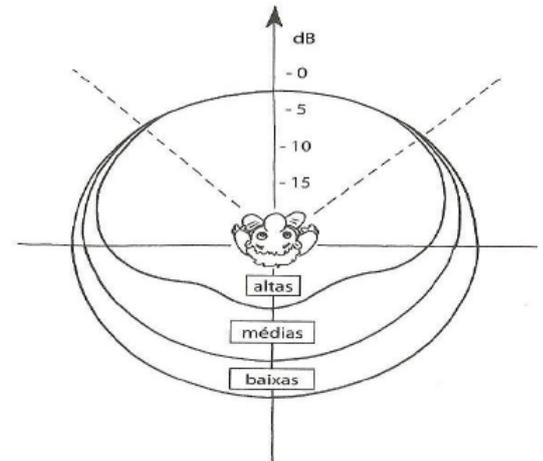
II.1.2 CAMPOS SONOROS

A onda sonora perde energia a ser propagada. A energia com que o som chega ao receptor é denominada intensidade sonora,

Imagem 35:

Direcionalidade da fonte sonora (voz humana).

Fonte: BRAGANÇA et al, 2012.



energia essa que não altera a frequência do som (CARVALHO, R., 2010, p. 28). A diferença de energia sonora do som emitido pela fonte e a intensidade sonora recebida pelo receptor está diretamente relacionada à qualidade do meio, e aos fenômenos que um som sofre ao ser propagado.

O reconhecimento do campo sonoro é de fundamental importância no estudo da acústica, pois define o meio de propagação, sua forma e a presença de objetos ou a total ausência. Se por um lado, temos um campo sonoro reverberante com obstáculos e fenômenos que descrevem as influências destes objetos na propagação do som, assume-se também o campo sonoro livre teórico.

Nesta parte do capítulo, iremos explorar os fenômenos que podem incidir sobre a onda sonora, associados aos campos sonoros teórico livre e reverberante. Para isso será apresentada a diferenciação dos campos sonoros e os respectivos fenômenos que colaboram para a perda de intensidade sonora.

“O som em um campo livre viaja em linha reta, desimpedido e sem desvios. O som desimpedido é o som não refletido, não absorvido, não difratado, não refratado, não difundido e não sujeito a efeitos de ressonância. Estes são todos os eventos que podem enfrentar um simples raio de som deixando uma fonte. O espaço livre não deve ser confundido com o espaço cosmológico. O som não pode viajar em um vácuo; exigia um meio como o ar. Aqui, espaço livre significa qualquer espaço aéreo no qual o som age como se estivesse no espaço livre teórico. O espaço livre limitado pode até existir em uma sala sob condições muito especiais”
(EVEREST, 2001, p. 83-84).²⁰

²⁰ Citação traduzida pela autora, do inglês: “Sound in a free field travels in straight lines, unimpeded and undeflected. Unimpeded sound is sound that is unreflected, unabsorbed, undiffracted, unrefracted, undiffused, and not subjected to resonance effects. These are all hazards that could (and do) face a simple ray of sound leaving a source. Free space must not be confused with cosmological space. Sound cannot travel in a vacuum; it required a medium such as air. Here, free space means any air space in which sound acts as though it is in the theoretical free space. Limited free space can even exist in a room under very special conditions. (EVEREST, 2001, p. 83-84)”

Para o campo reverberante considera-se a influência de superfícies ou obstáculos. *“O som que atinge uma superfície é transmitido, absorvido ou refletido; a quantidade de energia que vai para a transmissão, absorção ou reflexão depende das propriedades acústicas da superfície.”* (COX; D’ANTONIO, 2009, p. 1).²¹

II.1.2.1 FENÔMENOS DO CAMPO LIVRE

No campo livre, sem obstáculos, o fenômeno que interessa conhecer é o de decaimento. A intensidade da onda sonora, considerando apenas o som direto, decai à medida que se afasta da fonte, pois a área de distribuição da energia sonora aumenta (BRAGANÇA et al, 2012, p. 29). Como a propagação sonora é esférica – área da esfera é igual ao quadrado do raio –, a queda real de intensidade, à medida que se dobra a distância – raio – entre a fonte e o receptor, é de pelo menos 75% (Imagem 36).

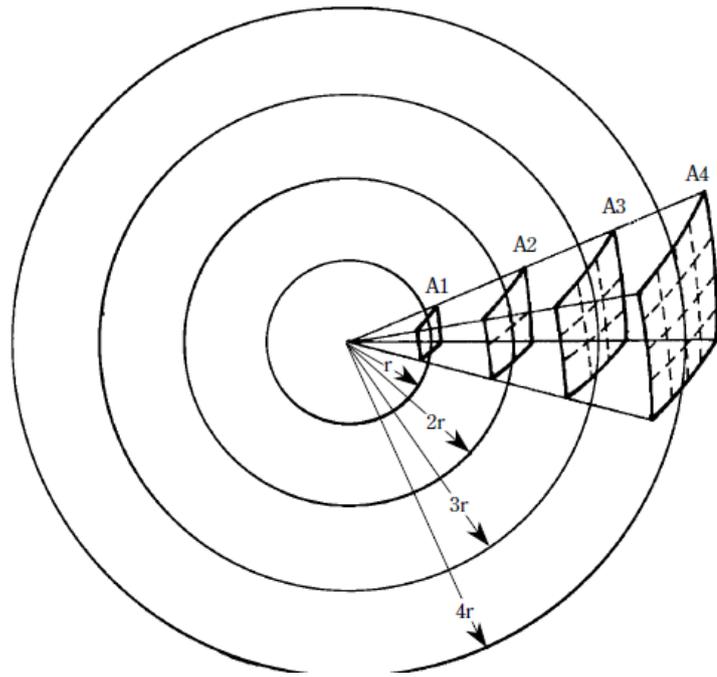
Devido ao decaimento da intensidade do som direto em função da distância, os locais mais próximos à fonte são os que possuem maior inteligibilidade. Por este motivo a experiência do som refletido, complementar ao som direto recebido, torna-se uma importante ferramenta na contribuição à inteligibilidade sonora dos receptores que se encontram longe da fonte.

²¹ Citação traduzida pela autora, do inglês: *“Sound striking a surface is transmitted, absorbed or reflected; the amount of energy going into transmission, absorption or reflection depends on the surface’s acoustic properties.”* (COX; D’ANTONIO, 2009, p. 1).

Imagem 36:

A mesma energia sonora é distribuída sobre superfícies esféricas com acréscimo de área de acordo com o crescimento de r . A intensidade do som é inversamente proporcional ao quadrado da distância, a partir do ponto de origem da emissão.

Fonte: EVEREST, 2001.



II.1.2.2 FENÔMENOS DO CAMPO REVERBERANTE

Para o campo reverberante, ao encontrar um obstáculo parte da energia sonora é transmitida para o lado oposto da face onde o som incide no obstáculo, parte é absorvida pelo obstáculo, e a parte resultante é refletida. A transmissão, absorção, reflexão e difração são os principais fenômenos do campo reverberante.

II.1.2.2.1 Transmissão

O fenômeno da transmissão ocorre quando o som atravessa um determinado obstáculo. Existem alguns motivos para que haja transmissão, dentre eles: pela presença de uma fenda, quando o obstáculo possui alguma abertura que permita a propagação contínua do som; ou por vibração, quando a onda sonora provoca a vibração do obstáculo, que por sua vez provoca a vibração do ar adjacente à sua face oposta.

II.1.2.2.2 Absorção

A absorção é a propriedade que possuem certos materiais de poderem transformar parte da energia sonora que sobre eles incide em outra qualquer modalidade de energia, geralmente térmica. Este fenômeno varia com a frequência do som. Quanto maior a frequência, maior absorção, esta é a razão pela qual os sons agudos são mais absorvidos do que os graves.

II.1.2.2.3 Reflexão

O fenômeno da reflexão sonora assemelha-se ao comportamento da ótica física. A superfície refletora, absorve parte da energia sonora, e a onda refletida tem seu ângulo em relação à superfície igual ao de incidência, como se sua fonte fosse sua imagem em um espelho. Para que a reflexão ocorra, é necessário que o espelho acústico tenha sua superfície maior que o comprimento de onda do som emitido (BRAGANÇA et al, 2012, p. 34).

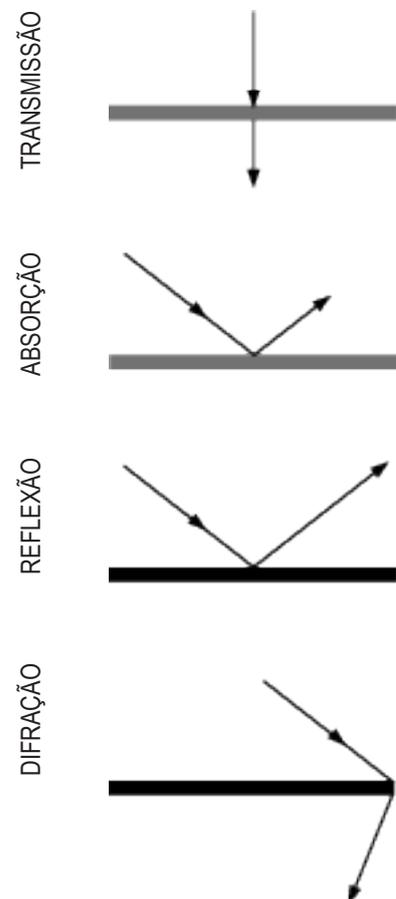
II.1.2.2.4 Difração

A difração consiste na propriedade que uma onda sonora possui de transpor obstáculos posicionados entre a fonte sonora e a recepção, mudando a direção e reduzindo sua intensidade (CARVALHO, R., 2010, p. 30). Quando um obstáculo é pequeno em relação ao comprimento de onda do som, sua propagação é redirecionada e contorna o obstáculo, neste caso as arestas do objeto atuam como um novo centro de propagação, de forma que a onda se recombina, como se o obstáculo fosse uma nova fonte (BRAGANÇA et al, 2012, p. 40).

Imagem 37:

Representação gráfica dos fenômenos do campo reverberante: transmissão, absorção, reflexão e difração.

Fonte: autora.



II.1.3 ESTUDO GEOMÉTRICO-ACÚSTICO

Introduzidos os conceitos e fenômenos relevantes para esta pesquisa, nos interessa aprofundar as questões geométrico-acústicas do espaço, com foco na análise da reflexão do som sobre a forma arquitetônica, dando destaque para os fenômenos de difusão do som e formação do foco acústico.

Para isso, será apresentada a teoria dos raios, um importante instrumento de auxílio ao projeto arquitetônico de interesse acústico; e um estudo sobre o comportamento dos raios sonoros refletidos sobre diferentes tipos de superfícies.

II.1.3.1 TEORIA DOS RAIOS

O raio sonoro é uma das principais ferramentas para retratar o som no estudo da forma, por ser de fácil compreensão, trata-se de uma representação vetorial – abstrata – do trajeto que um ponto de uma onda sonora percorre. Sob o ponto de vista geométrico do fenômeno, a representação é de grande simplicidade, entretanto, o raio sonoro não é capaz de expor o aspecto energético, uma vez que apenas uma parte de sua energia é refletida, sendo a outra absorvida e transformada no interior do material (CARVALHO, B., 1967, p. 13).

“Se um raio FI incide em uma superfície plana SS como na figura XX, pode-se facilmente determinar com precisão a direção do raio refletido. Para tal traça-se uma perpendicular a SS pelo ponto F e marca-se sobre esta de O para cima uma distância $AO = OF$. Unindo agora A a I , teremos a direção do raio refletido IR . O ponto A é denominado imagem acústica de F .

Se tivermos agora superfícies curvas, basta que se lhes trace as tangentes TT no ponto de incidência e se proceda em seguida como se tratasse de uma reflexão sobre uma superfície plana e que seria, no caso, a própria tangente” (CARVALHO, B., 1967, p. 19-20).

Apresentado o conceito da teoria dos raios, através dela seguem representações de como manipular ou conduzir o som através de modificações na forma construída.

II.1.3.2 ESPELHOS SONOROS

A reflexão, quando explorada arquitetonicamente, por meio de formas e direcionamentos apropriados de espelhos acústicos, é um excelente instrumento para permitir o reforço e a distribuição sonora, aumentando a intensidade e a homogeneidade do ambiente (BRAGANÇA et al, 2012, p. 36). Tal fenômeno pode gerar difusão e concentração do som.

Tais superfícies de reflexão sonora, quando utilizadas para reforçar o nível de intensidade sonora de locais específicos no ambiente, são denominados espelhos acústicos. Estes são compostos por material de baixa absorção sonora, para que seja evitada a queda de intensidade do raio refletido, e sua dimensão mínima deve ser maior ou igual ao comprimento de onda sonora para os quais deve ser promovida a reflexão (BRAGANÇA et al, 2012, p. 121).

A ser refletido por um espelho sonoro, quando uma porção significativa do som sofre dispersão espacial, trata-se de uma reflexão difusa. Em outros termos, a difusão corresponde ao

Imagem 38:

Estudo geométrico da teoria dos raios: representação do raio sonoro refletindo sobre superfície plana.

Fonte: CARVALHO, B., 1967.

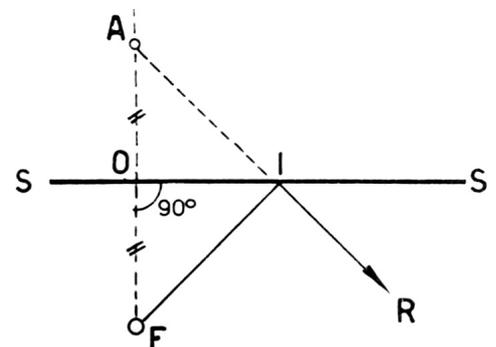
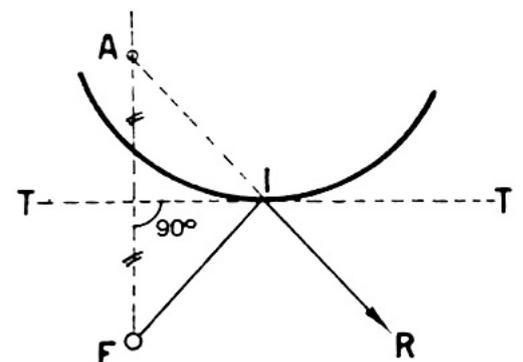


Imagem 39:

Estudo geométrico da teoria dos raios: representação do raio sonoro refletindo sobre superfície convexa.

Fonte: CARVALHO, B., 1967.



espalhamento dos raios sonoros, onde uma onda de mesma intensidade alcança maior abrangência, e em contrapartida, resulta em uma onda refletida de menor intensidade, pois a área de distribuição da energia sonora torna-se maior (BRAGANÇA et al, 2012, p. 39). É importante ressaltar que no projeto de espelhos acústicos difusores, o projetista deve estar atento ao fato de a perda de energia não seja muito acentuada.

Ao contrário da difusão, ao invés do espalhamento do som, a concentração corresponde à convergência dos raios sonoros em um ponto chamado foco, resultando em uma onda refletida de maior intensidade, com acúmulo de energia sonora, o que por sinal deve ser sempre evitado nos auditórios quando se encontrar situado à altura dos ouvidos dos espectadores.

Observando agora dois raios sonoros provenientes de uma mesma fonte, podemos estabelecer algumas consequências da reflexão em termos da forma da superfície refletora:

Se esta for plana, os raios sonoros serão divergentes e o som difundido (CARVALHO, B., 1967, p. 14). Entretanto, por ser um espalhamento que já aconteceria pela distância percorrida, este fenômeno é denominado reflexão especular, quando os raios saem com a mesma angulação da incidência.

No caso da reflexão sobre um espelho acústico de superfície convexa, a área de abrangência dos raios será ainda maior que a promovida pela superfície plana, representando uma reflexão difusa, quando os raios saem com a angulação diferente à angulação de incidência.

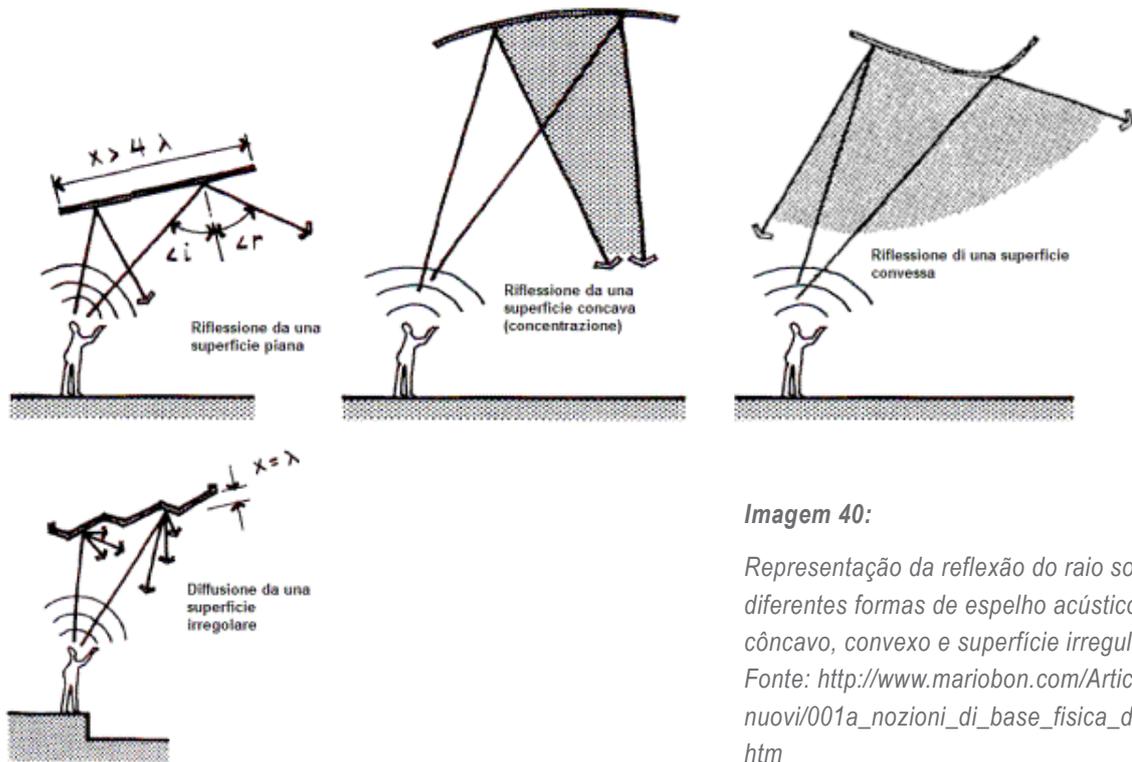


Imagem 40:

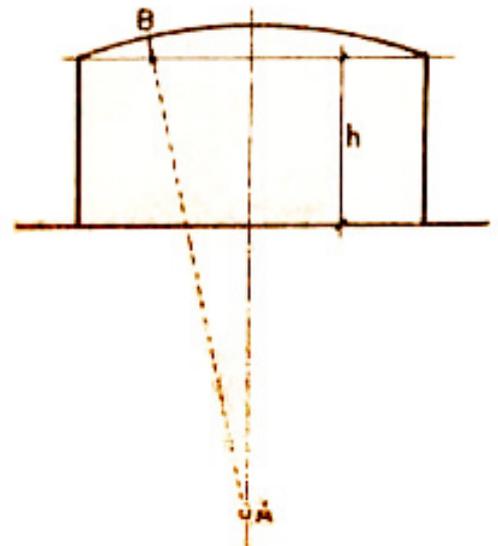
Representação da reflexão do raio sonoro sob diferentes formas de espelho acústico: plano, côncavo, convexo e superfície irregular.
 Fonte: http://www.mariobon.com/Articoli_nuovi/001a_nozioni_di_base_fisica_del_suono.htm

Entretanto, o caso que melhor retrata a reflexão difusa são os espelhos acústicos que apresentam rugosidade em sua superfície, e funcionam como difusores acústicos, aumentando o espalhamento sonoro. Existem tipos de difusores acústicos que possuem uma métrica específica para um espalhamento desejado, é o caso dos difusores QRD (quadratic residue diffusers) e as dimensões do difusor são definidas pela frequência sonora que se deseja atingir.

Por último, no caso da reflexão sobre um espelho acústico côncavo haverá concentração dos raios formando o foco acústico. O foco a princípio deve ser evitado, mas dependendo do local onde é formado esse não será percebido pelos receptores, e portanto é aceitável acusticamente, desde que a fonte e o receptor estejam externos à projeção de fechamento da superfície côncava, e que o raio de curvatura seja maior que o pé direito – segundo imagem ao lado.

Imagem 41:

Como se evita foco em seções transversais
 Fonte: CARVALHO, B., 1967.



São estes os tipos de superfícies mais utilizadas, combinadas para o controle direcional ou geométrico do som nos auditórios sem amplificação eletrônica.

II.1.3.3 FORMA E INTELIGIBILIDADE ACÚSTICA

“O som que é ouvido na maioria dos ambientes é uma combinação do som direto da fonte ou fontes e as reflexões indiretas de superfícies e outros objetos. Por exemplo, em ambientes acústicos, tanto o som direto quanto os reflexos das paredes, teto e piso são fundamentais para determinar a qualidade do som acústico. Para dar outro exemplo, ao ar livre, a reflexão do solo pode reduzir significativamente o ruído em certas frequências baixas. Assim, um dos tópicos centrais da acústica é como manipular essas reflexões que afetam a maneira como o som se propaga e, finalmente, é percebido ” (COX; D’ANTONIO, 2009, p. 1).²²

A ideia de trabalhar a relação entre o som direto e refletido para melhorar a inteligibilidade sonora, manipulando as reflexões que afetam a maneira com que o som se propaga e é recebido, através do exercício de condicionamento sonoro de um espaço, segundo a norma NBR 12179, pode ser definido como o *“processo pelo qual se procura garantir em um recinto o tempo ótimo de reverberação e, se for o caso, também a boa distribuição do som.”* Em outras palavras, consiste em dar ao espaço as melhores condições possíveis de audibilidade interna para todos os receptores, independente de sua posição na platéia, no caso de uma sala de espetáculos. E isso se faz segundo duas providências fundamentais: corrigir o tempo

²² Citação traduzida pela autora, do inglês: *“The sound that is heard in most environments is a combination of the direct sound straight from the source or sources and the indirect reflections from surfaces and other objects. For instance, in room acoustics, both the direct sound and the reflections from the walls, ceiling and floor are key in determining the quality of acoustic. To take another example, outdoors, the reflection from the ground can significantly reduce noise at certain low frequencies. Hence, one of the central topics in acoustics is how to manipulate these reflections that affect the way the sound propagates, and ultimately perceived.”* (COX; D’ANTONIO, 2009, p. 1).

de reverberação; promover a melhor distribuição possível dos sons gerados internamente via superfícies refletoras (e/ou absorventes) de sons, conforme uma geometria interna apropriada para o recinto (CARVALHO, R., 2010, p. 92).

II.1.3.3.1 Tempo de reverberação:

De acordo com a ABNT NBR 12179, é o tempo necessário para que um som deixe de ser ouvido, após a extinção da fonte sonora, é expresso em segundos. O tempo de reverberação é medido como o tempo necessário para que o som sofra um decréscimo de intensidade de 60dB.

Por este motivo, a reverberação está intimamente vinculada ao volume. Isso porque a “onda direta é acompanhada de uma sequência de ondas refletidas chegando sucessivamente ao ouvido do espectador” (CARVALHO, B. 1967, p. 29), à medida que elas chegam vão se tornando cada vez mais fracas, por causa das absorções que sofrem em cada reflexão, mas também pelo decaimento em relação à distância.

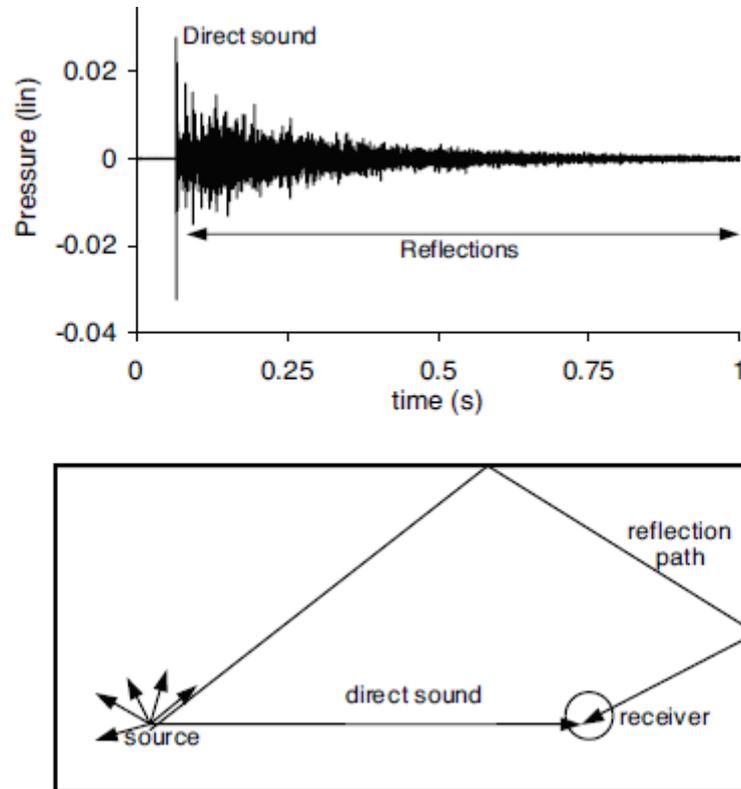
“Um bom projeto arquitetônico acústico requer o volume certo da sala, a forma adequada e os corretos tratamentos de superfície, utilizando uma combinação apropriada e a colocação de absorvedores, difusores e superfícies planas.” (COX; D’ANTONIO, 2009, p. 1).²³

²³ Citação traduzida pela autora, do inglês: “Good architectural acoustic design requires the right room volume, the right room shape and surface treatments, utilizing an appropriate combination and placement of absorbers, diffusers and flat surfaces” (COX; D’ANTONIO, 2009, p.1).

Imagem 42:

A resposta de um impulso sonoro em uma sala, e um típico exemplo de resposta sonora em uma sala de espetáculos.

Fonte: COX, 2009.



O seguinte gráfico que representa o tempo de permanência do som em um ambiente, mostra um pico inicial representado pelo som direto e uma cauda reverberante que ilustra a permanência e o decaimento do som refletido.

“Um longo tempo de reverberação implica baixa absorção. É difícil acreditar que as qualidades de absorção de som das paredes, do piso e do teto variam tanto dentro de uma faixa de frequência de alguns hertz.” (EVEREST, 2001, p. 131) ²⁴. Um ambiente pouco absorvente permite diversas reflexões, e uma

²⁴ Citação traduzida pela autora, do inglês: “Long reverberation time implies low absorbance. It is difficult to believe that the sound absorbing qualities of the walls, floor, and ceiling vary this much within a frequency range of a few hertz.” (EVEREST, 2001, p. 131).

permanência por um período maior de tempo, até que o som decaia 60 dB.

Um gráfico que apresente uma cauda reverberante curta, representa um espaço constituído de materiais bastante absorvivos, onde apenas as primeiras reflexões são recebidas pelo receptor.

Um gráfico que não apresente cauda reverberante, onde apenas o som direto é recebido, pode representar um campo sonoro livre teórico, sem reflexões, ou uma câmara anecóica, trata-se de uma sala onde todas as superfícies absorvem completamente o som que sobre elas incide.

II.1.3.3.2 Defeitos sonoros:

A busca pelo condicionamento sonoro evita certos defeitos na recepção do som, contribuindo para a inteligibilidade sonora do espaço, eco ou o eco palpitante (flutter eco) são exemplos de defeitos que podem ocorrer se não houver correção no tempo de reverberação e boa distribuição das reflexões sonoras.

Ao ser propagado, o intervalo de tempo existente entre a chegada do raio sonoro direto e a chegada dos raios refletidos é decorrente da distância percorrida por cada um desses raios, da fonte ao receptor – som direto – e da fonte, refletindo no obstáculo e chegando ao receptor. Como, normalmente, o raio direto percorre menor distância, é o primeiro a alcançar o receptor. Se a distância percorrida pelo raio direto é muito menor que a do raio refletido (diferença entre as distâncias maior que aproximadamente 11 metros), de forma que o intervalo de tempo entre as chegadas seja maior que 1/30 de segundo, o ouvido

humano percebe como se fossem sons separados, provocando o defeito acústico chamado eco. Caso contrário, a percepção do ouvido será como se fosse apenas um som (BRAGANÇA et al, 2012, p. 37). No caso do eco, o primeiro espelho acústico está longe o suficiente para que ao ser refletido, quando o som voltar ele será percebido como um outro som.

“O eco é classificado como palpitante quando se observam sucessivas reflexões entre paredes paralelas de uma sala, por exemplo” (CARVALHO, R., 2010, p. 34).

“Os ecos palpitantes podem ocorrer em espaços com duas grandes paredes paralelas. O padrão regular de reflexões causadas pelo som que vai e volta entre as paredes paralelas causa coloração. Por coloração, entende-se que a resposta de frequência do som é prejudicialmente alterada. Se você entrar em muitas escadas com paredes paralelas e bater palmas, um toque de alta frequência será ouvido; este é o eco palpitante.” (COX; D’ANTONIO, 2009, p. 17) ²⁵

II.1.3.4 CURVAS NOTÁVEIS

As aplicações a seguir demonstram um aprofundamento no controle de direcionamento da primeira reflexão para superfícies côncavas e convexas, através do estudo de curvas notáveis na acústica como elementos base para projeto de formas que performam boa reflexão acústica.

“As curvas planas oferecem um campo de estudo rico e até certo ponto inexplorado, que pode ser abordado de um nível bastante elementar” (LOCKWOOD, 1961, p. vii) ²⁶. Curvas que

²⁵ e ²⁶ Citações traduzidas pela autora, do inglês: *“Flutter echoes can occur in spaces with two large parallel walls. The regular pattern of reflections caused by sound bouncing back and forth between the parallel walls causes coloration. By coloration, it is meant that the frequency response of the sound is detrimentally altered. If you go into many stairwells with parallel walls and clap your hands, a high frequency ringing will be heard; this is the flutter echo.” (COX; D’ANTONIO, 2004/2009, p. 17).*

“Plane curves offer a rich and to some extent unexplored field of study which may be approached from a quite elementary level.” (LOCKWOOD, 1961, p. vii)

acusticamente possuem propriedades interessantes, quando passam por algumas transformações geométricas que elevam sua dimensão, costumam a manter as mesmas propriedades. Ao revolucionarmos um semicírculo entorno de um eixo, é possível desenhar uma cúpula. Através dos estudos com raios sonoros da figura plana do semicírculo, pode-se prever o comportamento do som em um domo.

A facilidade de projetar formas através do design computacional, é um grande potencial para que o arquiteto explore um repertório formal mais abrangente com menos esforços operacionais, utilizando lógica de transformação e elementos simples. Se as formas forem produto de transformação geométrica de curvas notáveis da acústica, partimos para uma exploração de um campo formas de grande interesse sonoro.

Para isto, a seguir serão demonstradas equações polares como meio de construção do círculo, parábola e elipse, evidenciando suas propriedades notáveis na acústica, além de algumas experimentações em transformações geométricas, com foco na revolução das curvas.

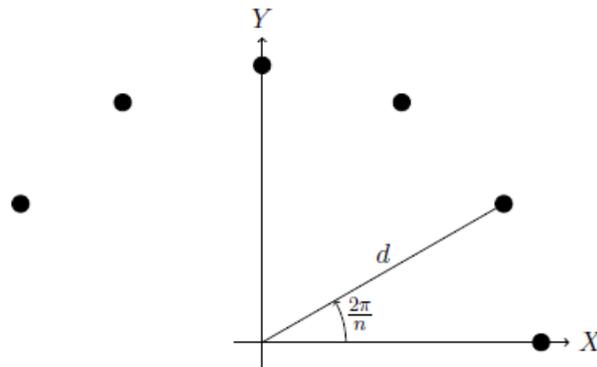
Existem diversos meios de construção das curvas de geometria plana, as equações cartesianas ou polares são exemplos de meios construtivos. As equações cartesianas utilizam o sistema de coordenadas cartesianas, onde x , y e z definem a locação de um ponto, embora este sistema seja muito utilizado, existem outros sistemas de coordenadas que podem ser mais úteis em determinadas situações (LEITÃO, 2016, p. 37).

“A título de exemplo, imaginemos que queremos dispor n elementos igualmente espaçados a uma distância d da origem, tal como está parcialmente ilustrado na figura abaixo. Como é lógico, os elementos acabarão por formar um círculo e o ângulo entre cada dois elementos terá de ser $2\pi/n$ ” (LEITÃO, 2016, p. 37-38).

Imagem 43:

Posições ao longo de um círculo.

Fonte: LEITÃO, 2016.



Neste trabalho, onde as curvas serão utilizadas considerando os focos como elementos decisivos, opta-se pela preferência às equações polares, que a curva surge através da ligação dos pontos de cada ângulo dado a partir do foco.

II.1.3.4.1 Elipse:

PROPRIEDADE ACÚSTICA DA CURVA

Conforme demonstrado na **Imagem 44**, a soma das distâncias dos segmentos SP e PS' será sempre a mesma, desde que P esteja posicionado sobre a curva. Desta maneira, se uma fonte sonora estiver posicionada em um dos focos, o som refletido – sobre uma superfície de base elíptica – irá convergir para o foco oposto, se um receptor estiver posicionado neste segundo foco, este receberá todas as ondas sonoras refletidas ao mesmo tempo. O formato de uma sala elíptica permite que o

som emitido de um dos focos seja perfeitamente recebido pelo foco adjacente, mesmo existindo uma barreira entre estes dois pontos que impeça a chegada do som direto.

EQUAÇÃO POLAR

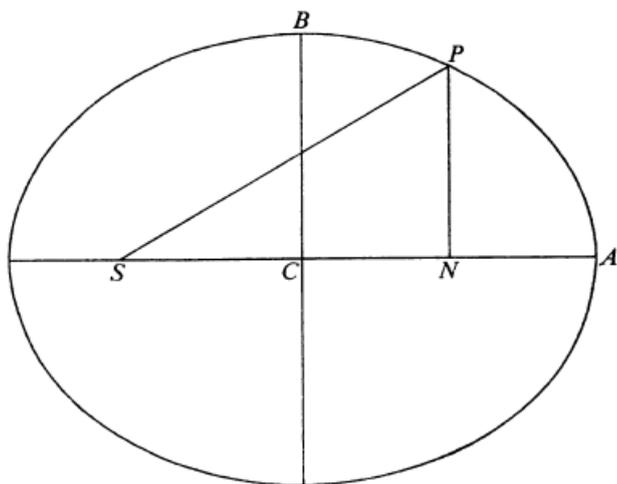
A elipse é constituída por dois pontos focais, um eixo menor, um eixo maior, um centro e a excentricidade.

“AA’ é chamado de eixo maior da elipse e a corda BCB’, traçada através de C em ângulos retos até AA’ é o eixo menor. Quanto mais próximo S estiver de A, mais estreita será a elipse(...). Assim, as elipses podem variar em forma e tamanho (ao contrário das parábolas, que são todas semelhantes em forma). A variação na forma é medida pela razão CS:CA, que é chamada de excentricidade. É menor que 1. O comprimento de CA (o semi-eixo maior) é geralmente denominado por a e a excentricidade por e. Assim $CA = a$ e $CS = ae$ ” (LOCKWOOD, 1961, p. 14).²⁷

Imagem 44:

Elipse: construções geométricas.

Fonte: LOCKWOOD, 1961.



²⁷ Citação traduzida pela autora, do inglês: “AA’ is called the major axis of the ellipse and a chord BCB’, drawn through C at right angles to AA’ is the minor axis. The nearer S is to A, the narrower will be the ellipse; i.e. the shorter will be the minor compared with the major axis. Thus ellipses can vary in shape as well as in size (unlike parabolas, which are all similar in shape). The variation in shape is measured by ratio CS:CA, which is called the eccentricity. It is less than 1. The length of CA (the major semi-axis) is usually denoted by a and the eccentricity by e. Thus $CA = a$ and $CS = ae$.” (LOCKWOOD, 1961, p. 14)

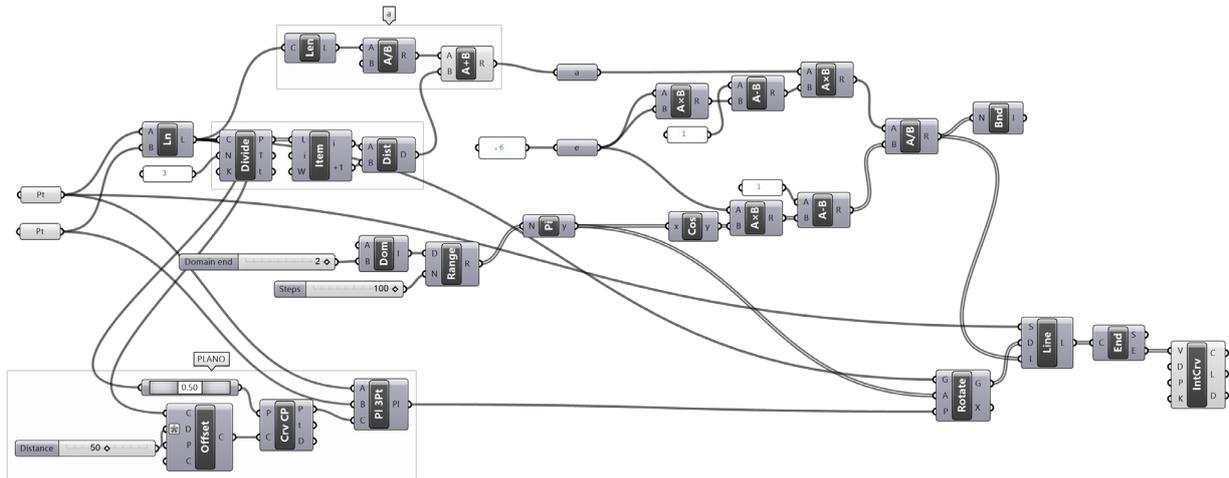
Imagem 45:

Construção da Elipse segundo equação polar, em código produzido no Grasshopper.
 Fonte: autora.

Sendo r a distância de SP:

$$r = a(1-e^2) + r.e.\cos\theta$$

$$r(1 - e.\cos\theta) = a(1 - e^2)$$

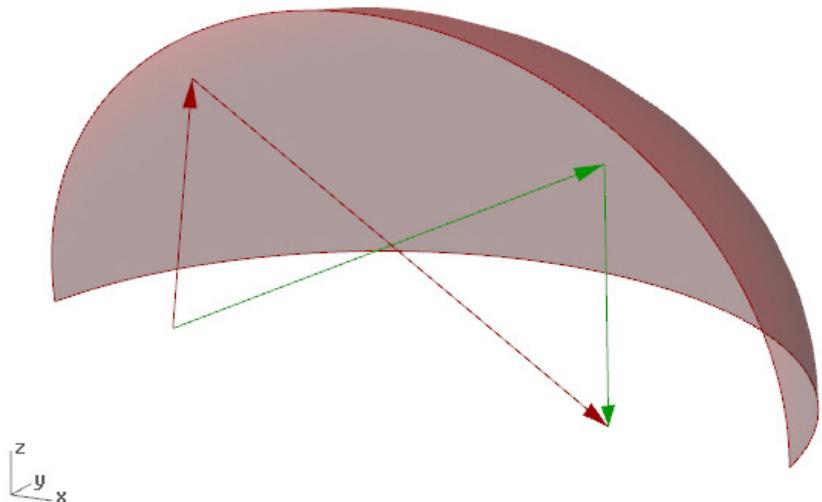


TRANSFORMAÇÕES E COMPORTAMENTO SONORO

Ao revolucionar a curva elipse, ou seu segmento de curva, o som emitido do primeiro foco retorna ao segundo foco, e vice versa, ao ser rebatido em qualquer parte da superfície (Imagem 46)

Imagem 46:

Transformações com a Elipse: superfície de interesse acústico.
 Fonte: autora.



II.1.3.4.2 Parábola:

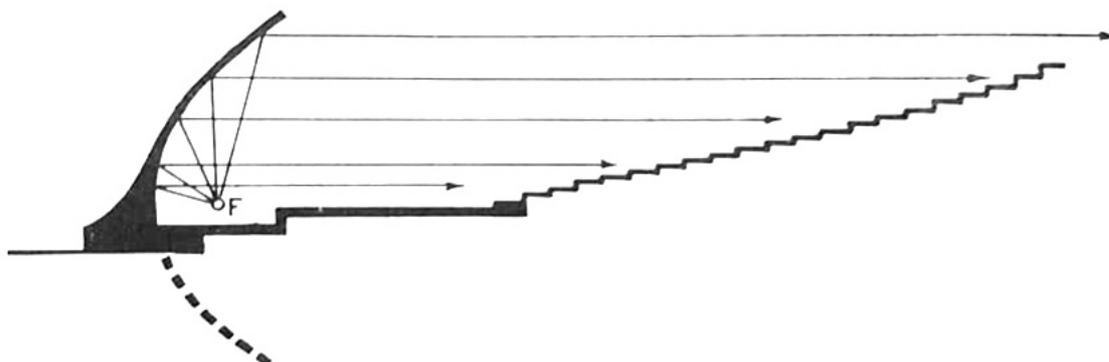
PROPRIEDADE ACÚSTICA DA CURVA

“Esta é a propriedade refletora da parábola. Se um espelho é feito na forma de um parabolóide (isto é, a superfície formada pela rotação de uma parábola em torno do seu eixo), os raios do foco S seriam refletidos em raios paralelos ao eixo. Um feixe de holofote é produzido dessa maneira. Pela mesma razão, os raios que entram, paralelos ao eixo, seriam focados em S . Essa é a maneira pela qual um telescópio refletor produz uma imagem precisa de uma estrela, livre de aberrações esféricas ou cromáticas.” (LOCKWOOD, 1961, p. 6).²⁸

Imagem 47:

Parábola: propriedades da curva, aplicação na acústica.

Fonte: CARVALHO, B. 1967.

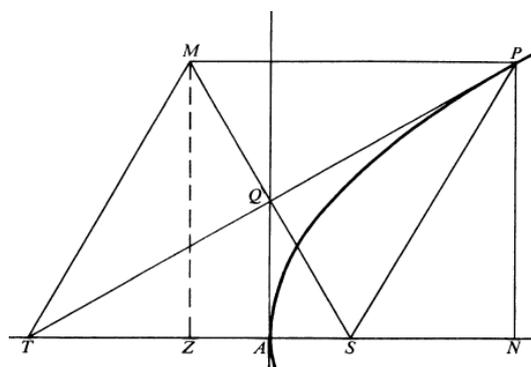


O paralelismo com que os raios sonoros refletidos saem de uma superfície parabolóide, é de grande alcance, de maneira que o decaimento da intensidade sonora é pequeno, uma vez que após a reflexão, uma onda antes esférica agora se propaga de maneira linear, desde que a fonte sonora esteja localizada no foco da parábola. O efeito contrário também é possível, uma vez que sobre uma superfície parabolóide incidem raios paralelos entre si e paralelos em relação ao seu eixo ao serem refletidos, estes convergem ao foco.

Imagem 48:

Parábola: construções geométricas.

Fonte: LOCKWOOD, 1961.

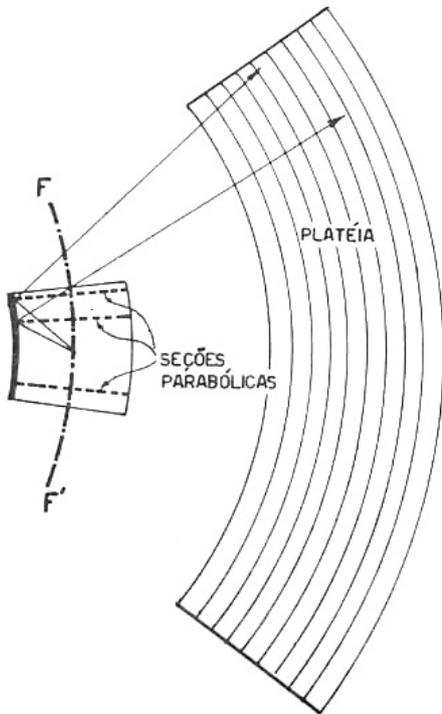


²⁸ Citação traduzida pela autora, do inglês: “This is the reflecting property of the parabola. If a mirror is made in the form of a paraboloid (i.e. the surface formed by rotating a parabola about its axis), rays from the focus S would be reflected into rays parallel to the axis. A searchlight beam is produced in this ways. For the same reason rays coming in, parallel to the axis, would be focused at S . This is the ways in which a reflecting telescope produces an accurate image of a star, free from spherical or chromatic aberration.” (LOCKWOOD, 1961, p. 6).

Imagem 49:

Parábola: propriedades da curva, aplicação na acústica.

Fonte: CARVALHO, B. 1967.



Entretanto “a forma de um parabolóide de revolução tem inconvenientes de – muito embora reproduzam fielmente e conduzam a grandes distâncias os sons partidos das proximidades de seu foco – não conseguem fazer o mesmo com os que se originam de fontes sonoras que se afastam daquele ponto, como é o caso das grandes orquestras” (CARVALHO, B., 1967, p. 48).

EQUAÇÃO POLAR

Conforme **imagem 48**, a parábola é constituída por um eixo, onde se encontram o foco S e o vértice da parábola A. A distância entre o vértice da parábola e o foco irá determinar a escala da parábola.

Sendo r a distância de SP, $SA = a$:

$$r = 2a + r \cdot \cos\theta$$

TRANSFORMAÇÕES E COMPORTAMENTO SONORO

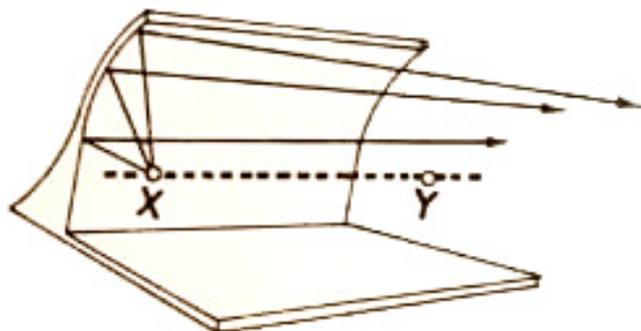
A parábola é bastante utilizada em projetos de cocha acústica.

“Quando se trata de projetar sobre o público o som proveniente de um orador ou de um pequeno conjunto orquestral, a forma mais indicada para este refletor sonoro é a da parabolóide de revolução, e isto porque a parábola é uma curva que (...) tem a propriedade de expelir, paralelos entre si, todos os raios que partem de seu foco e a tocam.” (CARVALHO, B., 1967, p. 48).

Imagem 50:

Concha acústica em cilíndrico parabólico, com translação de parábola.

Fonte: CARVALHO, B. 1967.



“Se a platéia for muito grande e disposta mais sobre o sentido da largura, desenha-se o perfil da ‘concha’ de maneira que a superfície por ela gerada seja uma sucessão de parábolas cujos focos se achem todos sobre uma mesma linha curva.”
(CARVALHO, B., 1967, p. 48).

Os exemplos acima, descritos por Benjamin Carvalho (1967), explicitam dois tipos de transformação geométrica da curva parábola para geração de superfícies de interesse acústico. O primeiro exemplo de revolução e o segundo uma extrusão seguindo uma linha curva.

II.1.3.4.3 Círculo:

PROPRIEDADE ACÚSTICA DA CURVA

O círculo ou segmento de círculo são curvas recorrentes na acústica quando se trata de reflexão e controle da distribuição sonora, pela sua propriedade difusora e simplicidade de produção. Quanto maior sua curvatura – menor diâmetro –, maior será o espalhamento dos raios sonoros refletidos, por este motivo o arquiteto deve moderar a curvatura para que não haja muita diminuição da energia sonora.

Esta curva possui um bom desempenho na melhora de condições de audibilidade em centro de praças ou áreas

circulares, produzem excelentes resultados quando aplicada no teto dos coretos.

EQUAÇÃO POLAR

Variando o ângulo do vetor em relação ao centro, o raio do círculo não varia.

TRANSFORMAÇÕES E COMPORTAMENTO SONORO

O segmento de círculo, ao sofrer a transformação da revolução gera uma cúpula ou uma calota (Imagem 51).

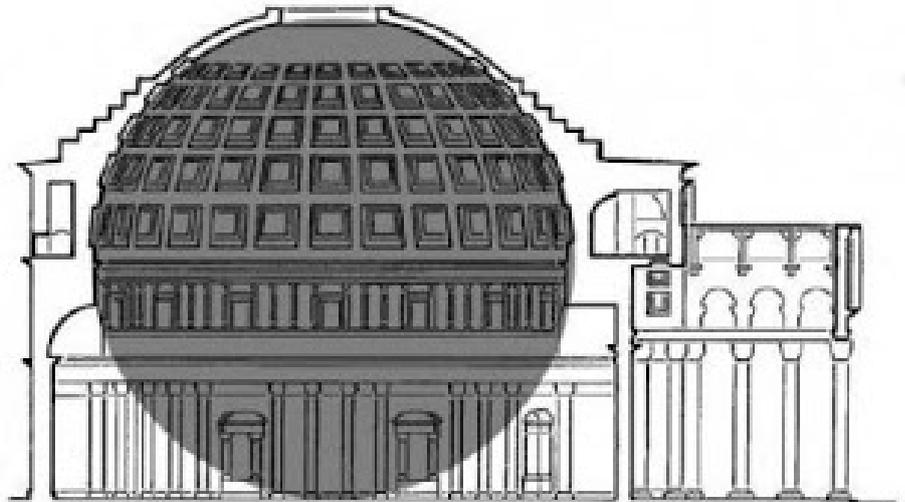


Imagem 51:

Cúpula Panteon de Roma.

Fonte: <http://panteondeagripa.blogspot.com/2013/04/el-panteon-de-agripa-el-panteon-de.html>

II.2 Impacto da Performance sobre a Forma Arquitetônica.

Nesta etapa interessa construir um senso crítico sobre o impacto da performance na forma arquitetônica.

A arquitetura dos trópicos possui características comuns às suas condições ambientais, como exemplo das grandes aberturas que garantam circulação cruzada, coberturas generosas com largos beirais e inclinação própria para proteger o ambiente interno das chuvas tropicais. Enquanto isso, em locais de baixíssima temperatura, existem artificios formais que contribuem para isolamento térmico e cobertura com inclinação adequada para pouca retenção da camada de gelo e neve. Estas são demonstrações de como a performance ambiental do edifício tem impacto direto na forma. A medida de importância e influência do desempenho técnico sobre a forma do edifício sempre foi elemento de discussão, e as opiniões sobre o tema são adversas.

No desenvolvimento de um trabalho que aborde o tema de geração da forma e performance, levantar este debate é essencial para construção de um senso crítico. Principalmente, neste momento de desenvolvimento ferramental que permitem ao profissional maior liberdade de experimentação da forma. Ao dirigirmos a manipulação formal a partir de critérios performáticos, a questão se torna fundamental.

Para isso serão apresentadas diferentes visões de profissionais, que trabalham no campo teórico e prático, sobre a questão geral da performance e seu impacto na forma arquitetônica afim de

construir um senso crítico sobre o tema, que será abordado de maneira objetiva no capítulo seguinte, do ponto de vista da acústica arquitetônica.

O termo otimização da arquitetura é recorrente na bibliografia estrangeira, associado ao termo performance, mas no Brasil é mais comum utilizarmos o termo desempenho.

A otimização, pode ser descrita como o processo através do qual se obtém o melhor valor de uma grandeza. Do radical otimizar, sugere, criar condições mais favoráveis para tirar melhor partido possível de algo, ou ainda, estabelecer o valor ótimo de alguma coisa.

Enquanto, desempenho é a maneira como atua ou se comporta alguém ou algo, avaliada em termos de eficiência, de rendimento. E performance é atuação ou desempenho, e ainda, espetáculo em que o artista atua com inteira liberdade e por conta própria, interpretando papel ou criações de sua própria autoria. Dadas as descrições dos termos concluímos que, desempenho é uma avaliação, e otimização é um processo de alcançar um bom desempenho, uma boa avaliação. Já a performance é um termo mais abrangente, que além do desempenho, também sugere atuação.

As referências utilizadas para a discussão são todas estrangeiras, por este motivo utilizaremos o termo performance em toda a sua abrangência, ao invés de desempenho.

Em um exercício dialético, a fim de criar um senso crítico sobre o tema da otimização, serão apresentadas diferentes visões de teóricos e práticos de arquitetura.

No ano de 2003, a conferência sobre *Performative Architecture*, organizada por Branko Kolarevic e Ali Malkawi, na Universidade da Pensilvânia, reuniu alguns críticos e práticos de arquitetura, com o objetivo de discutir sobre a desconexão existente entre geometria e análise, com o crescente uso das ferramentas digitais disponíveis na época. Neste momento, começaram a surgir questionamentos como: até que ponto a performance, no sentido de desempenho, deveria influenciar o projeto, e o que performance significa em arquitetura, em toda sua abrangência. Kolarevic e Malkawi lançaram o livro, *Performative Architecture: Beyond Instrumentality*, em 2005, com o conteúdo da conferência, onde estão reunidos os artigos dos participantes, apresentando diferentes pontos de vista sobre o tema. E dentre muitas visões tecnicistas, foram selecionados para este trabalho os posicionamentos críticos de três participantes, que valem ser destacados, são eles: David Leatherbarrow, Thomas Herzog e Ali Rahim.

Antes de adentrar na discussão sobre performance, David Leatherbarrow (2005) ressalta a importância da tecnologia e da estética na arquitetura, mas afirma que a experiência é essencial para que a arquitetura não seja reduzida à um objeto que resulta de técnicas projetuais e construtivas; ou que representa práticas e ideias. Posto isto, Leatherbarrow rejeita a suposição sobre performance, de que:

“o desenvolvimento de novos instrumentos e métodos que prevêm o comportamento estrutural ou ambiental do edifício irão redefinir radicalmente a prática e a teoria disciplinar. Talvez, a atenção à performance irá contribuir para uma nova compreensão no modo em que as construções são imaginadas, produzidas e experienciadas. Mas esta nova compreensão não será resultado apenas do desenvolvimento e emprego de novas técnicas. A manutenção da dedicação à interpretação técnica da performance irá conduzir a nada mais que uma reafirmação superficial do pensamento funcionalista old-style – um pensamento tanto reducionista quanto inadequado pois reconhece apenas o que pode prever” (LEATHERBARROW, 2005).²⁹

E assim Leatherbarrow desenvolve sua visão sobre performance arquitetônica, no termo mais abrangente da palavra, explorando as possíveis maneiras que um edifício atua: abrigando atividades e experiências, atendendo às expectativas dos usuários; se ajustando – através de mecanismos cinéticos, para atenuar determinadas condições particulares; trabalhando para manter boas condições internas aos usuários, ao resistir às forças e contraforças da gravidade, vento, insolação – situações que se pode prever, mas não se pode ser completamente assertivo. Apesar de tanger ao valor técnico, Leatherbarrow propõe o olhar pela perspectiva do usuário.

Assim como Leatherbarrow, Thomas Herzog (2005) contribui com uma visão mais abrangente que a tecnicista, ele alerta para o dever do arquiteto de se manter dentro de uma compreensão holística para sistemas complexos, e atenta para a necessidade

²⁹ Citação traduzida pela autora, do inglês: *“Development of new instruments and methods of predicting the building’s structural or environmental behavior will radically redefine the discipline’s practice and theory. Perhaps attention to performance will contribute to a new understanding of the ways buildings are imagined, made and experienced. But this new understanding will not result from the development and deployment of new techniques alone. The continued dedication to a technical interpretation of performance will lead to nothing more than an uncritical reaffirmation of old-style functionalist thinking - a kind of thinking that is both reductive and inadequate because it recognizes only what it can predict. I will return to this point below.” (LEATHERBARROW, 2005)*

de co-operação de uma equipe multidisciplinar. Herzog (2005) afirma que *“grande parte dos problemas que enfrentamos, a respeito de recursos naturais é atribuído aos processos unilaterais de otimização, nos quais a atenção insuficiente é dada aos potenciais efeitos colaterais.”*³¹

Ali Rahim (2005) apresenta um terceira visão crítica sobre performance na arquitetura, além da eficiência, através da elucidação da diferença entre técnica e tecnologia, entretanto, sem definir um limite de interferência da performance ao projeto arquitetônico. Para Rahim:

“disciplinas técnicas são constituídas entorno de equipamentos essencialmente funcionais e inevitavelmente orientados em direção à eficiência. Esta obsessão pela eficiência é prevalecente na sociedade e refletido no projeto de equipamentos e sistemas, mas isto não demonstra entendimento da tecnologia, como ela existe historicamente, como existe hoje e deve existir no futuro. Tecnologia não é mera técnica; é uma ativa e transformadora entidade que tem como resultado, novos e diferentes efeitos culturais. Tecnologia neste sentido não é uma prática efficiency-oriented, medida por quantidades, mas uma determinação qualitativa de relações que interagem com estímulos culturais, resultando em atitudes, onde algumas delas são técnicas” (RAHIM, 2005).³²

³¹ e ³² Citações traduzidas pela autora, do inglês:

“A large part of the problem we face today in respect to the natural resources is attributable to one-sided processes of optimization, in which insufficient attention is paid to potential side-effects.” (HERZOG, 2005)

“Technical disciplines are constituted around devices conceived as essentially functional and therefore inevitably oriented towards efficiency. This obsession with efficiency is prevalent throughout society and is reflected in the design of many devices and systems, but it has not demonstrated an understanding of technology as it has existed historically, as it exist today, and as it may exist in the fututre. Technology is not merely technical; it is an active and transformative entity resulting in new and different cutural effects. Technology in this sense is not as efficiency-oriented practice, measured by quantities, but a qualitative set of relationships that interact with cultural stimuli, resulting in behaviours, some of which are techniques.” (RAHIM, 2005)

O livro *Performative Architecture: Beyond Instrumentality*, composto com as diferentes visões de diversos profissionais, tem como objetivo discutir pontos de vista e não sugere um limite de interferência da performance ao projeto arquitetônico. Este trabalho também não possui a pretensão de identificar os limites ideais entre técnica e estética na arquitetura, pelo contrário, tem como objetivo a experimentação das ferramentas digitais, aplicadas à otimização acústica em projetos de arquitetura.

capítulo III: EXPERIMENTOS

A partir do conteúdo estudado na fundamentação teórica, os primeiros ensaios práticos foram produzidos abordando as temáticas levantadas: Design Computacional e Acústica Arquitetônica. Inicialmente, foi feito um experimento com o uso dos Algoritmos Genéticos na adequação acústica de uma sala fechada, como meio de experimentação deste mecanismo. Ao fim deste ensaio, iniciou-se o pensamento crítico sobre a aplicação pura da técnica, e o despertar do interesse sobre um olhar holístico, que também se concentrasse em questões estéticas. Desta maneira, o segundo experimento foi proposto como investigação de técnicas paramétricas em um processo orientado pelo desempenho acústico, com a problemática projetual de lidar com um meio em constante alteração, onde a adaptação torna-se elemento essencial à resiliência do projeto. Esta atitude coloca o meio como variável, e o algoritmo como estrutura que se adapta ao meio.

Com isso, explorar novas possibilidades de manipulação das variáveis, mesmo após a cristalização da arquitetura construída, tornou-se a questão central da segunda experimentação. Entretanto, este exercício só é possível se o algoritmo do projeto for desenhado de maneira que permita esta manipulação das variáveis, posterior à construção da arquitetura.

Neste sentido, o objetivo deste capítulo é produzir experimentações com foco em projeto de arquitetura com alto desempenho acústico, com aplicações digitais de métodos do Design Computacional, que levantem questionamentos sobre diferentes possibilidades de instanciamento formal, sendo: o primeiro experimento caracterizado como instanciamento automático e único da forma, utilizando o processo performativo generativo (algoritmos genéticos para otimização acústica); e o segundo experimento caracterizado como instanciamento manual e contínuo da forma, utilizando o processo performativo formativo (paramétrico orientado pelo desempenho acústico).

Na sequência descrita por Rivka Oxman (2005) o modelo formativo é apresentado antes do modelo generativo, entretanto optou-se por expor os experimentos na ordem cronológica em que foram produzidos.

O PRIMEIRO EXPERIMENTO

O Algoritmo Genético é um mecanismo com estruturas fixas de etapas bem definidas a cumprir, a abstenção de uma etapa pode acarretar na inviabilidade do algoritmo. No caso da inserção dos dados suceder de maneira correta, o instanciamento da forma ocorre de maneira automatizada, e de acordo com sua proposta metodológica, as soluções são apresentadas como soluções finais. A proposta é experimentar este estruturado processo, em um ensaio crítico de maneira a construir o passo a passo de inserção de dados e preencher os requisitos

demonstrando as dificuldades e possibilidades, para enfim apresentar seus resultados e reflexões.

O SEGUNDO EXPERIMENTO

O processo de parametrização é um recurso de automatizar a forma através de algoritmos de livre construção. O projetista desenvolve o algoritmo e insere dados e variáveis de acordo com suas estratégias projetuais e seu processo de trabalho. Por não haverem regras iniciais, a parametrização não possui etapas bem definidas e a viabilidade do código não depende de nenhum mecanismo pré-estabelecido. A proposta é experimentar um processo, de contínua geração de soluções, onde se possa repensar a estrutura arquitetônica com certa flexibilidade às alterações do meio. E que possíveis mudanças no local possam gerar impacto na arquitetura – crescimento e diminuição, sem que o propósito principal de condução acústica seja inviabilizada.

III.1 Experimento 1: processo performativo generativo - algoritmos genéticos

O escopo do projeto definido para esta primeira experimentação é a adequação acústica de uma sala de espetáculos, com otimização no posicionamento de espelhos acústicos para uma distribuição desejável do som refletido – primeira reflexão.

O projeto explora o método dos algoritmos genéticos como um meio alternativo à adequação acústica de ambientes fechados, especialmente no processo de concepção formal do espaço otimizado, através do uso da ferramenta computacional para geração de forma. Uma das aplicações do Design Computacional são os Algoritmos Genéticos, que como método da Computação Evolucionária, faz referência às teorias evolutivas de Darwin para evolução de sistemas, na busca de soluções para um ou mais problemas apresentados. Dependendo da complexidade de um determinado problema, os processos convencionais de projeto arquitetônico, que partem de fluxogramas, na maioria das vezes se demonstram ineficientes por apresentarem poucas soluções; os algoritmos genéticos por sua vez são capazes de apresentar diversas soluções formais para um mesmo problema.

Em decorrência do surgimento e difusão de softwares que facilitam a utilização e exploração de tais métodos, emerge a necessidade de compreender as particularidades práticas deste processo, bem como metodologias para sua utilização em solução de problemas formais no campo da acústica.

Neste experimento será produzido um ensaio prático da evolução formal de um modelo arquitetônico, sob um determinado problema acústico, cujas soluções apresentadas com o uso dos algoritmos genéticos serão analisadas sob uma visão crítica. O ensaio será baseado em experiências descritas em bibliografia consultada, onde todo seu processo experimental será demonstrado e comentado, bem como estabelecimento das restrições, construção dos algoritmos, manipulação das variáveis e etc., para facilitação de usos posteriores. Na realização do ensaio foram utilizados os softwares Rhinoceros (versão 5.11 – 64 bits), Grasshopper

(versão 0.9.0076) e Galápagos (construído dentro da versão utilizada de Grasshopper).

O Galápagos é um plugin que opera os Algoritmos Genéticos sem um desempenho técnico definido, por este motivo o profissional deve ser capaz de inserir de adequadamente os dados necessários ao funcionamento do mecanismo, estar apto à inserir todo o passo a passo, e saber desenvolver matematicamente a função fitness, ou função objetiva. Diferente do software Karamba, plugin específico para desempenho estrutural (demonstrado no capítulo 1), onde o usuário encontra a maior parte dos dados pré-definidos: função fitness, cargas, seção e suporte. Durante a pesquisa, não encontrou-se plugins de algoritmos genéticos específico para otimização acústica, por este motivo optou-se pela flexibilidade do Galápagos.

III.1.1 PRÉ-EXPERIMENTO: AUTOMATIZAÇÃO DA REPRESENTAÇÃO DE RAIOS

Antes de iniciar o passo a passo de inserção de dados no mecanismo do método dos algoritmos genéticos, automatizou-se o estudo geométrico-acústico de uma sala de espetáculos, com foco na distribuição da primeira reflexão.

Uso do design computacional, para produção de forma arquitetônica, é experimentado através da criação de uma lógica, onde a inserção de novos valores para suas variáveis permite a manipulação formal. A criação da lógica é direcionada através do interesse do projetista em gerar soluções formais para a problemática projetual. Esta automatização coloca a problemática da distribuição da primeira reflexão como elemento principal a ser solucionado espacialmente, sem análise de intensidade sonora.

A lógica da teoria dos raios (demonstrada no capítulo 2) foi transcrita na linguagem dos softwares, com técnicas paramétrica, utilizados como meio de representação da onda sonora emitida e refletida. Três modelos foram produzidos, sendo o primeiro um estudo simples do fenômeno da reflexão em um único espelho acústico plano, o segundo com nove espelhos aproximando o experimento de um estudo formal de uma sala de espetáculos e o terceiro com um espelho convexo.

III.1.1.1 Primeiro modelo:

O primeiro modelo teve como objetivo transcrever a lógica da teoria dos raios para a linguagem computacional, para estudo da reflexão sobre um espelho acústico plano.

A lógica foi construída da seguinte maneira (Imagem 52):

- 1 A fonte está representada por um ponto localizado no espaço cartesiano à 1,75 metros de altura – $pt(0,0,1.75)$.
- 2 Em um plano paralelo a XZ, com origem variável presa ao vetor Y – $pt(0,y,0)$, foi construído um arco de 180° e raio igual a 8,00 metros. Que irá servir de trilho para o painel refletor do raio sonoro, o espelho acústico.
- 3 A este arco, de comprimento igual à um no espaço paramétrico, foi locado um ponto de posição variável, dentro do limite 0 – 1, do comprimento paramétrico da curva.
- 4 Ao ponto foi inserida uma superfície plana como representação do espelho acústico de dimensões 3,00 x 3,00 metros, a partir de seu centro, e sua normal foi ajustada a normal da curva referente ao ponto de locação.

- 5 Uma nova linha foi criada conectando o ponto que representa a fonte sonora ao centro da superfície que representa o espelho sonoro. Esta linha, representa o raio sonoro, que sai da fonte e percorre um percurso em linha reta até o espelho acústico. Como representação da reflexão sonora, esta linha foi rotacionada em torno da normal ao plano em 180° , indicando a direção do raio refletido.
- 6 A superfície plana, que representa o espelho acústico, foi projetada no plano XY direcionada pela linha rotacionada – o raio refletido. A nova superfície criada pela projeção simula a área que recebe a onda sonora refletida por aquele espelho acústico.

Imagem 52:

*Estudo de automatização da teoria dos raios: representação da fonte emitindo o raio sonoro refletindo no espelho acústico plano e área de recepção do som refletido projetada no piso.
Fonte: autora.*

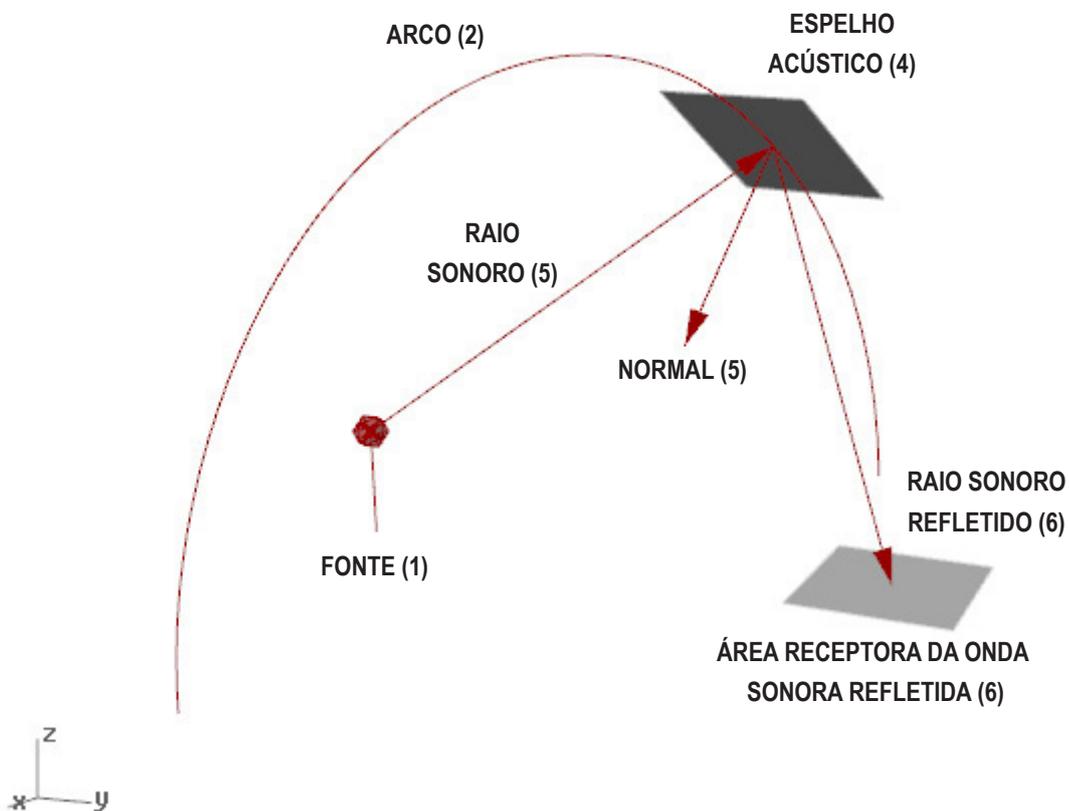
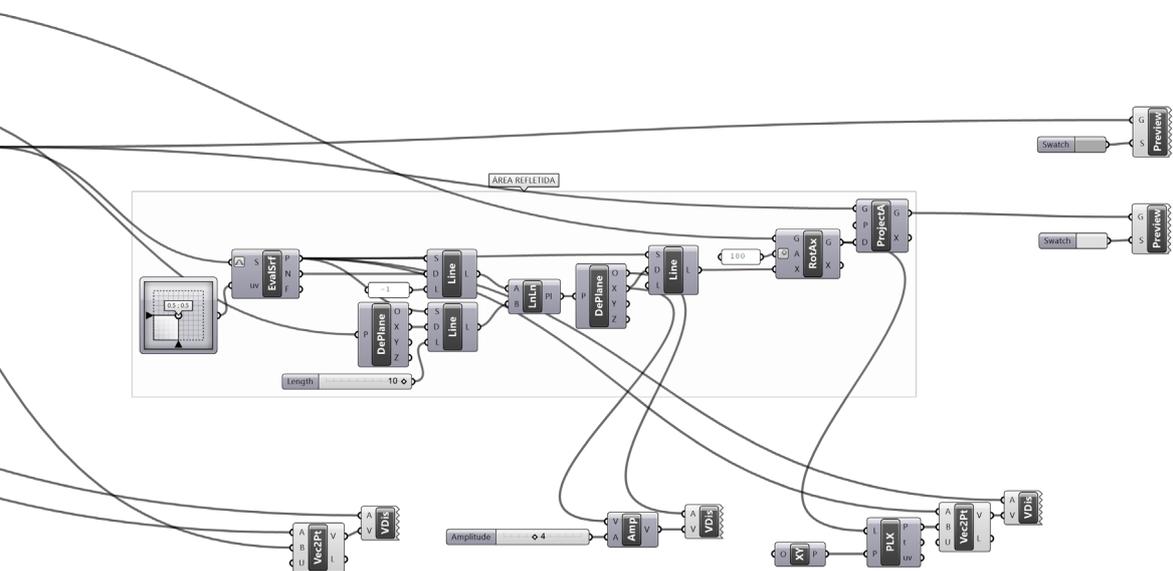
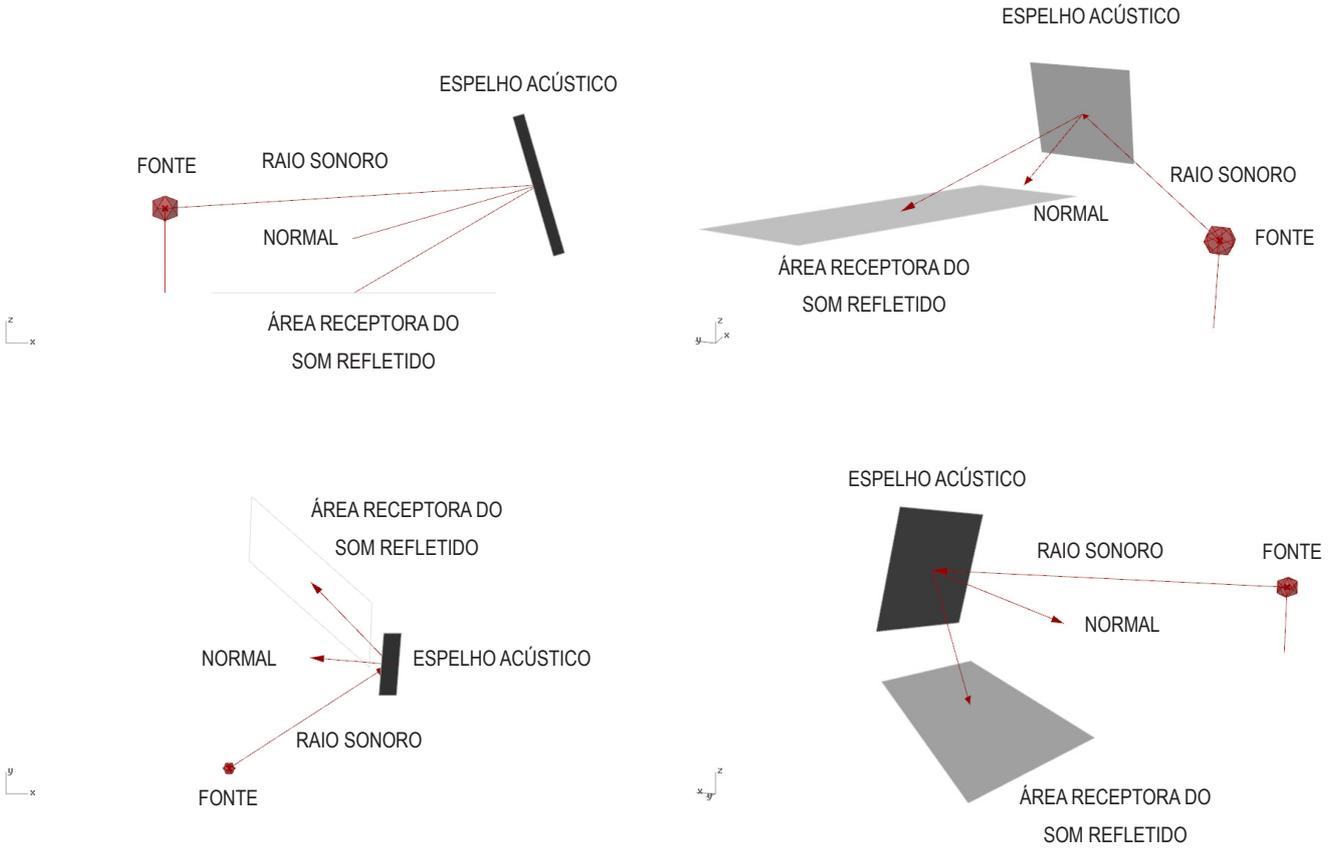


Imagem 54:

Automatização da teoria dos raios: vistas da representação da fonte emitindo o raio sonoro refletindo no espelho acústico plano e área de recepção do som refletido projetada no piso.
 Fonte: autora.



III.1.1.2 Segundo modelo:

O segundo modelo teve como objetivo reproduzir o ambiente simplificado de uma sala de espetáculos (Imagens 55 e 56), replicando o sistema produzido no modelo anterior para superfícies localizadas nas paredes e teto, de modo que produza um sistema manipulável para estudo geométrico-acústico da sala.

Por ser um modelo simplificado, apenas os painéis refletores serão representados, a ausência de obstáculos representa o encerramento do espaço com superfícies cuja propriedade seja de absorção total do som.

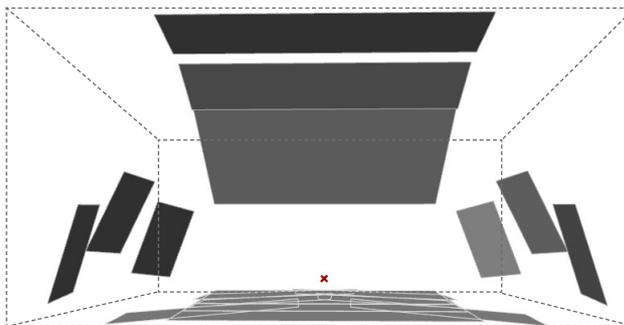
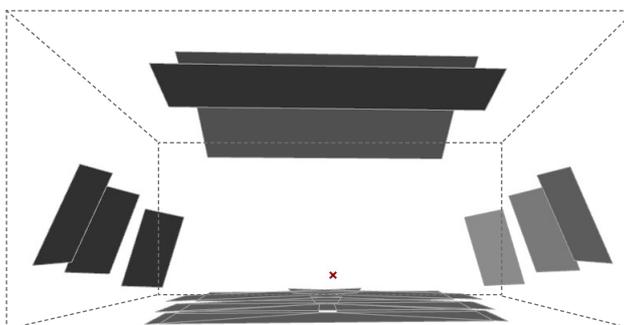
O sistema do modelo anterior foi mantido, como lógica e variáveis, e a composição das superfícies refletoras foi construída da seguinte maneira:

Imagem 55:

Vista 1: representação simplificada de sala de espetáculos com nove espelhos acústicos planos e áreas de recepção do som refletido projetadas no piso.

Duas soluções formais geradas através da manipulação dos valores dos parâmetros.

Fonte: autora.



- 1 Foram construídos três arcos para locação das superfícies refletoras nas seguintes posições em y: 5,00 m; 8,80 m; e 13,00 m.
- 2 Para cada arco foram locadas três superfícies refletoras, totalizando nove superfícies, duas locações para as paredes (opostas entre si) e uma locação para o teto. Para facilitar a manipulação das superfícies, e considerando a simetria bilateral da propagação sonora de uma fonte, cuja a direcionalidade esteja alinhada ao eixo longitudinal da sala, apenas uma das locações das paredes foi transformada em variável, a segunda é um espelhamento da primeira.
- 3 As dimensões das superfícies refletoras foram definidas: as seis superfícies localizadas nas paredes com dimensão igual a 3,00 x 3,00 metros; as duas superfícies de teto mais próximas da fonte com dimensão igual à 3,00 x 10,00 metros; e a superfície de teto mais distante da fonte sonora com dimensão igual à 7,90 x 10,00 metros.

Imagem 56:

Vista 2: representação simplificada de sala de espetáculos com nove espelhos acústicos planos e áreas de recepção do som refletido projetadas no piso.

Dois soluções formais geradas através da manipulação dos valores dos parâmetros.

Fonte: autora.

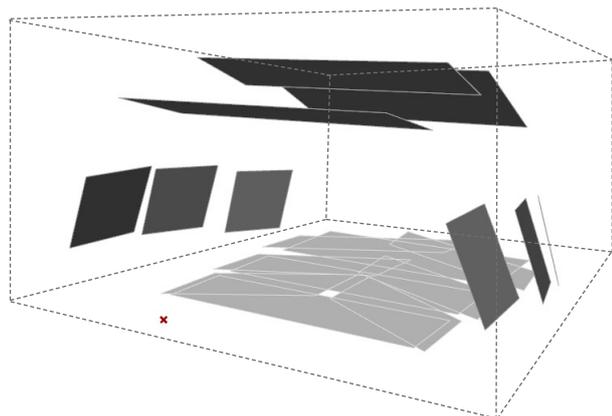
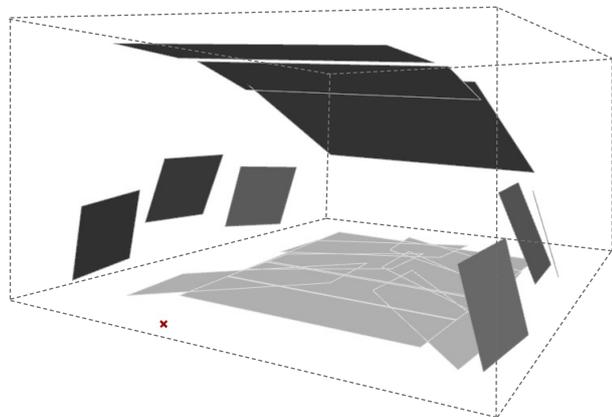
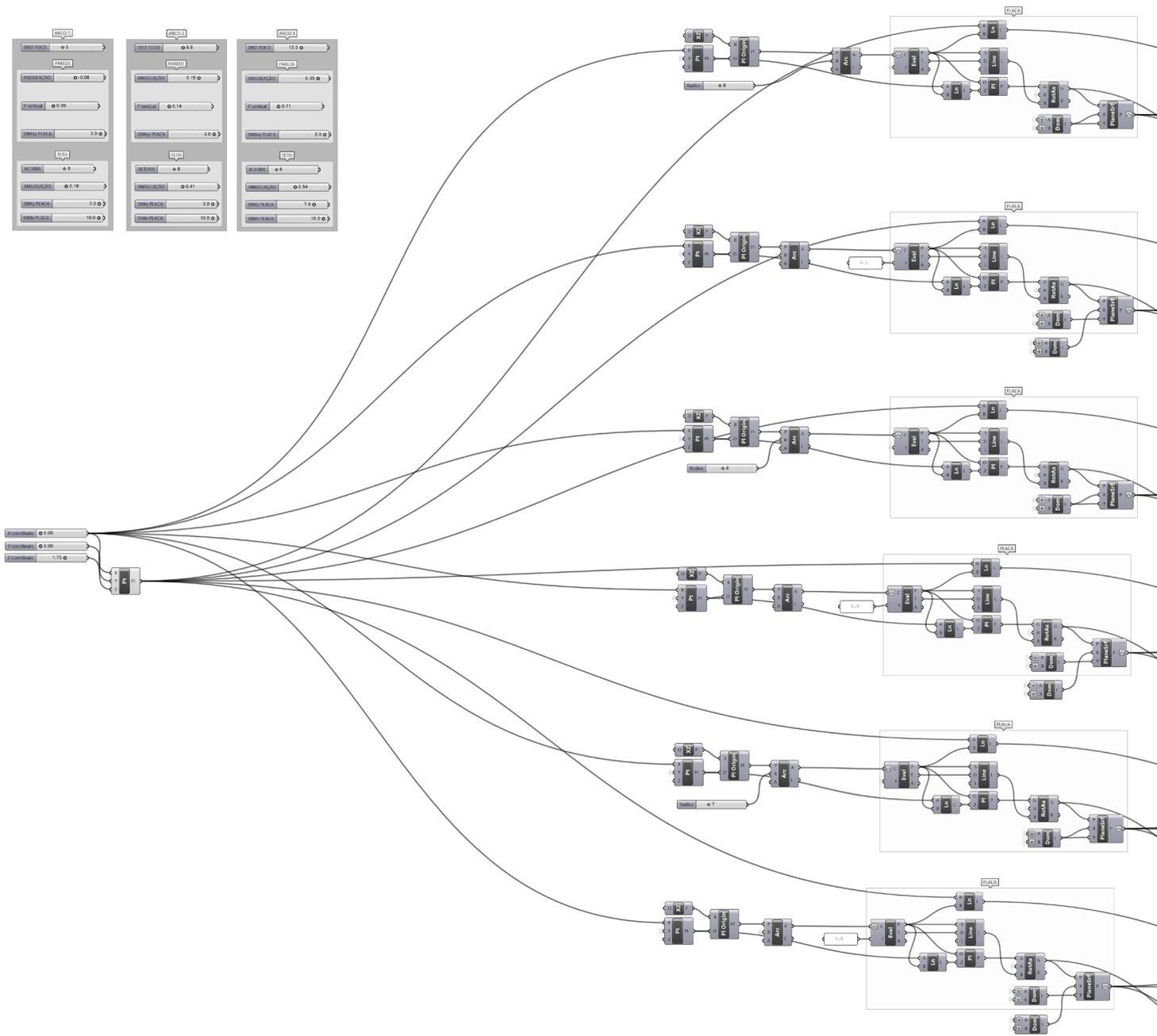


Imagem 57:

Sistema de condicionantes produzido em código no Grasshopper: representação simplificada de sala de espetáculos com nove espelhos acústicos planos e áreas de recepção do som refletido projetadas no piso.

Fonte: autora.



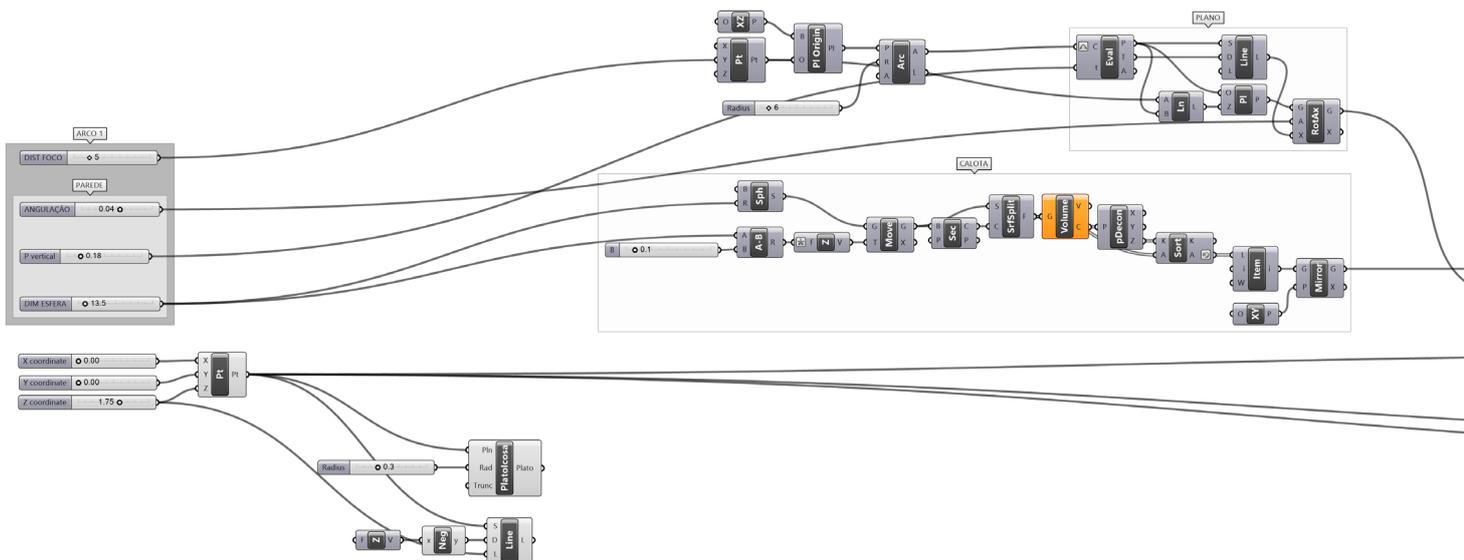
III.1.1.3 Terceiro modelo:

Este modelo substituiu a superfície plana dos modelos anteriores por uma superfície convexa (Imagem 59), aumentando a dispersão e a área de recepção do som refletido.

Imagem 58:

Sistema de condicionantes produzido em código no Grasshopper: código de automatização da teoria dos raios com fonte de emissão sonora, espelho acústico convexo e área de recepção do som refletido projetada no piso.

Fonte: autora.

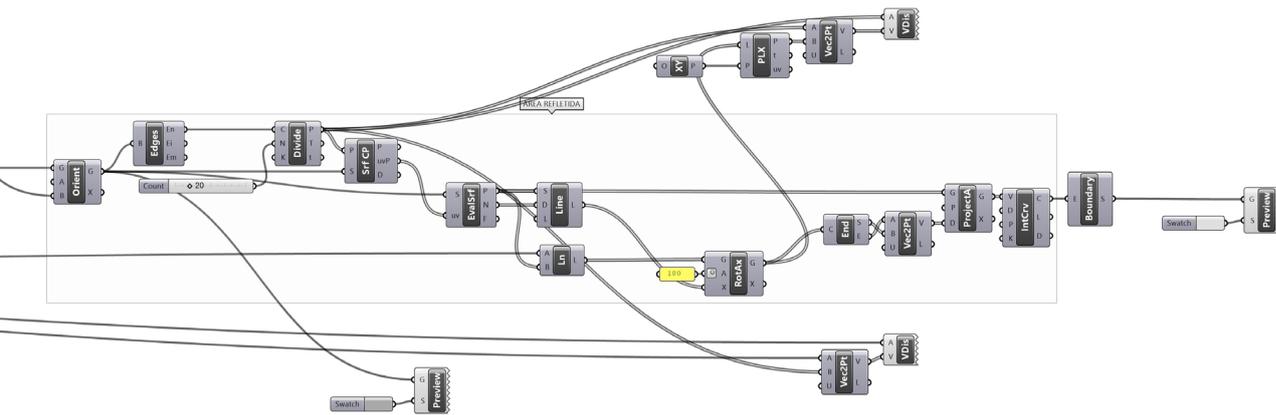
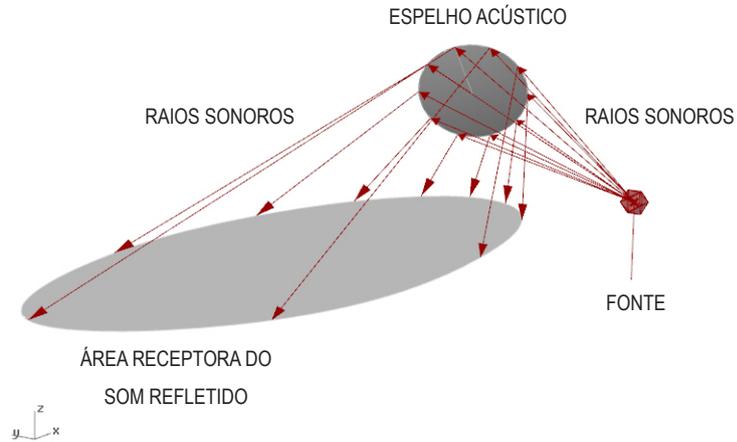


A elaboração da proposta do espelho convexo, demonstrou um equívoco na construção lógica dos modelos anteriores, a utilização de um único vetor, representando o raio sonoro refletido, como direcionamento da projeção do espelho acústico sobre a plateia, simulava uma área de recepção sonora menor do que a real.

Constatou-se que, ao invés de analisar a reflexão apenas do ponto central da superfície, é necessário criar mais vetores que ligam a fonte à diversos pontos

Imagem 59:

Visualização no Rhinoceros de código produzido no Grasshopper: representação simplificada da teoria dos raios com fonte de emissão sonora, espelho acústico convexo e área de recepção do som refletido projetada no piso.
Fonte: autora.



situados no perímetro da borda do espelho, identificar a normal à superfície naquele ponto, para então gerar o vetor que representa os raios refletidos. Neste caso, ao invés de projetar a superfície, serão projetados os pontos estudados no perímetro da borda do espelho, e a interpolação destes pontos passa a definir a área que recebe o som refletido.

Após a automatização da lógica da teoria dos raios para o software, com seus devidos ajustes, iniciou-se a inserção de dados no mecanismo dos algoritmos genéticos.

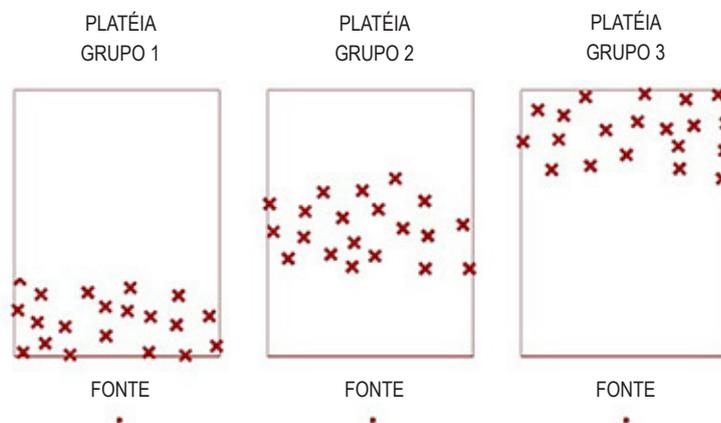
III.1.2 ALGORÍTMOS GENÉTICOS

Considerando que os Algoritmos Genéticos operam através de reprodução de indivíduos, recombinação com herança e variação, para o funcionamento do sistema são necessários outros três requisitos: a solução de inicialização que sofrerá reprodução, a avaliação que determinará se a solução é digna de reprodução, e o término.

III.1.2.1 Problema projetual:

Através da busca por uma solução formal de uma sala de espetáculos, com distribuição ótima dos raios sonoros de primeira reflexão, foram propostas as primeiras estratégias projetuais. A distribuição sonora dos raios de primeira reflexão, para esta situação foi considerada ótima no caso que preencha os determinados requisitos (Imagem 60): o grupo de receptores mais próximo a platéia deve receber apenas o som direto; o grupo de receptores mais afastado da platéia deve receber o som direto e o som refletido duas vezes; e o grupo central de receptores deve receber apenas um som refletido, além do som direto.

Imagem 60:
Divisão da platéia em três grupos com objetivos diferentes.
Fonte: autora.



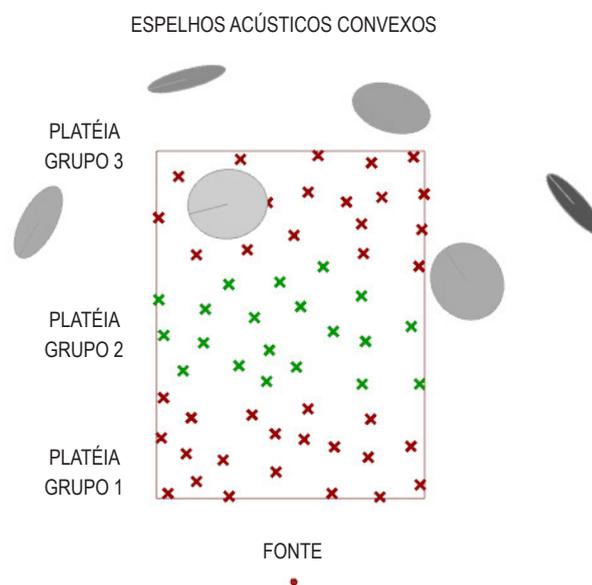
III.1.2.2 Estratégias para solução do problema:

Com o problema e a proposta de otimização estabelecidos, foi possível definir as primeiras estratégias de solução do problema e estipular maneiras de interagir com o mecanismo dos Algoritmos Genéticos. Deste modo, para simplificar o experimento, decidiu-se por um espaço cujas superfícies fossem consideradas 100% absorventes de sons e a reflexão seria orientada por seis espelhos sonoros em formato de calota, dispostos sobre a platéia, sendo a superfície convexa a área reflexiva (Imagem 61). A normal dos espelhos foram reorientadas de modo que respondessem à proposta de distribuição ótima das primeiras reflexões. Tal situação considera uma fonte sonora única, localizada no centro do palco e a platéia. Assim começou a estipular as principais características físicas da solução de inicialização.

Imagem 61:

Montagem do modelo inicial com fonte, platéia e espelhos acústicos.

Fonte: autora.



A partir deste cenário, foi preciso produzir um sistema que possibilitasse a produção de grandes quantidades de soluções, capaz de delinear o espaço de busca. Para isso, foi necessário indicar os objetos do modelo passíveis de sofrer transformações, e o tipo de transformação que estes objetos irão sofrer. Neste caso, como designado na estratégia de solução do problema, ficou especificado

que haveria uma busca pela orientação ótima dos espelhos acústicos para cumprir com a exigência determinada – platéia dividida em três grupos com objetivos diferentes quanto a quantidade de recepção de raios sonoros de primeira reflexão. Portanto, os objetos de transformação são os seis espelhos acústicos e o tipo de transformação.

Em um primeiro modelo foi experimentado o alinhamento vetorial da normal do espelho, em determinadas direções, como tipo de transformação formal, entretanto observou-se que esta opção atribui pouca liberdade ao sistema, por este motivo, substituiu-se pelo modelo de rotação das superfícies nos eixos X e Y.

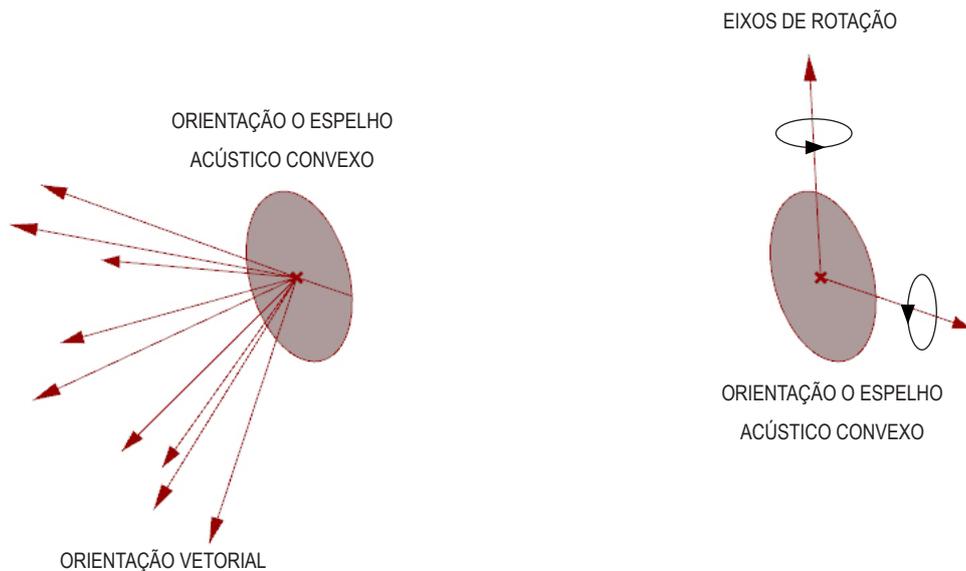
Imagem 62:

Ajustes no sistema de transformação da inclinação dos espelhos acústicos.

(1) instâncias vetoriais para a normal do espelho.

(2) eixos X e Y para rotação.

Fonte: autora.



Com a solução de inicialização determinada, e o início da construção do espaço de busca estabelecido pelo sistema de variabilidade formal, foi necessário trabalhar sobre o sistema de avaliação dos resultados – como aprofundada no capítulo 1 –, que será responsável por julgar se uma solução é digna de ser reproduzida ou finalizada.

Neste panorama, primeiramente, para cada solução de inclinação das placas o sistema de avaliação deve verificar o número de reflexões que cada espectador recebe, e posteriormente verificar se o número de reflexões recebidas é satisfatória. Logo, duas etapas de validação foram definidas, sendo a primeira bastante propícia a ser resolvida através de um sistema geométrico, enquanto a segunda, através de um sistema aritmético.

Para isso, sobre a área definida como região de platéia, foram distribuídos 60 pontos, de maneira aleatória simulando uma platéia em pé, sem poltronas. Utilizando a projeção vetorial da placa, desenvolvida em etapa pré-experimental, como demonstração de área que recebe som refletido através do direcionamento do espelho sonoro. A partir desses dois elementos – pontos representando pessoas e superfícies representando área que recebe som refletido – avalia-se a quantidade de áreas – que recebem reflexões – que cada ponto pertence, ou seja, se um ponto estiver inserido em apenas uma área que recebe reflexão, o sistema retornará o valor igual a um. Desta maneira é possível contabilizar a quantidade de primeira reflexão sonora que os espelhos direcionam aos os espectadores simulados.

Resolvida a primeira etapa de validação, a segunda trata de construir a função fitness, ou a função objetiva dos Algoritmos Genéticos.

III.1.2.3 Definição da função *fitness*:

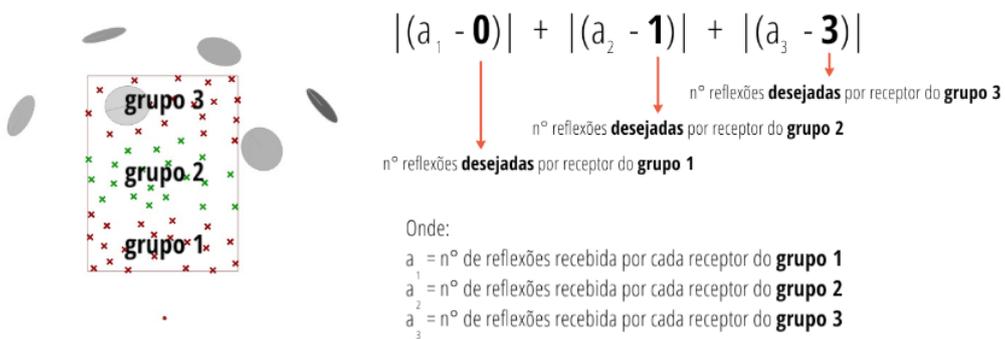
No problema, não será possível validar uma solução analisando quantidade de reflexões que apenas um espectador recebe, necessita-se definir uma função que analise todos os espectadores para cada variação produzida. A função deve ser elaborada de modo que não gere dúvidas na validade do resultado, ou o sistema retornará resultados ruins como soluções ótimas. Para elucidar melhor a importância desta construção, o ANEXO deste trabalho demonstra e comenta todo o processo definição da função *fitness*, e suas discussões geradas.

A função utilizada neste experimento foi declarada da seguinte maneira (Imagem 63):

Imagem 63:

Definição da função *fitness*.

Fonte: autora.



$$|(a_1 - 0)| + |(a_2 - 1)| + |(a_3 - 3)|$$

\downarrow \downarrow \downarrow
 n° reflexões **desejadas** por receptor do **grupo 1** n° reflexões **desejadas** por receptor do **grupo 2** n° reflexões **desejadas** por receptor do **grupo 3**

Onde:

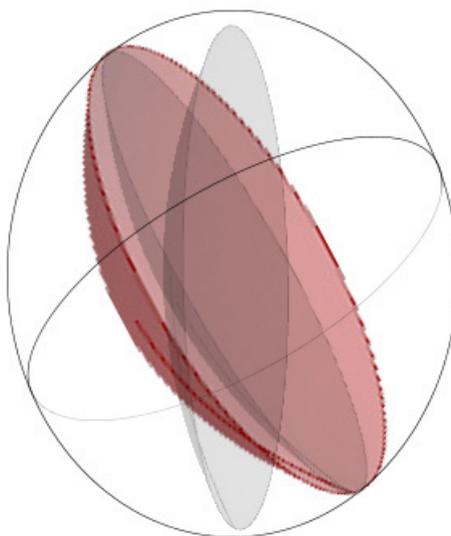
- a_1 = n° de reflexões recebida por cada receptor do **grupo 1**
- a_2 = n° de reflexões recebida por cada receptor do **grupo 2**
- a_3 = n° de reflexões recebida por cada receptor do **grupo 3**

III.1.2.4 Ajustes e etapas finais:

Com a função objetiva definida, precisamos determinar os limites do espaço de busca, a denominada penalidade. Dentro do sistema de variabilidade formal, foram definidos os objetos passíveis de sofrerem transformação – os espelhos sonoros –, e o tipo de transformação, no caso a rotação nos eixos X e Y. Entretanto, se liberarmos o sistema para experimentar a rotação dos 2 eixos para os seis espelhos a 360° ou 2π , podemos rapidamente imaginar que muitas das soluções experimentadas são inúteis ao nosso resultado, como por exemplos a situação onde o espelho está rotacionado em relação à fonte com sua face contrária à reflexiva. Alguns ângulos criam soluções ruins possíveis de se prever, e se não forem eliminados dos limites da penalidade, acabam por sobrecarregar o sistema, o software e o hardware na busca da solução ótima.

Imagem 64:

*Rotação do espelho acústico nos eixos X e Y.
Fonte: autora.*



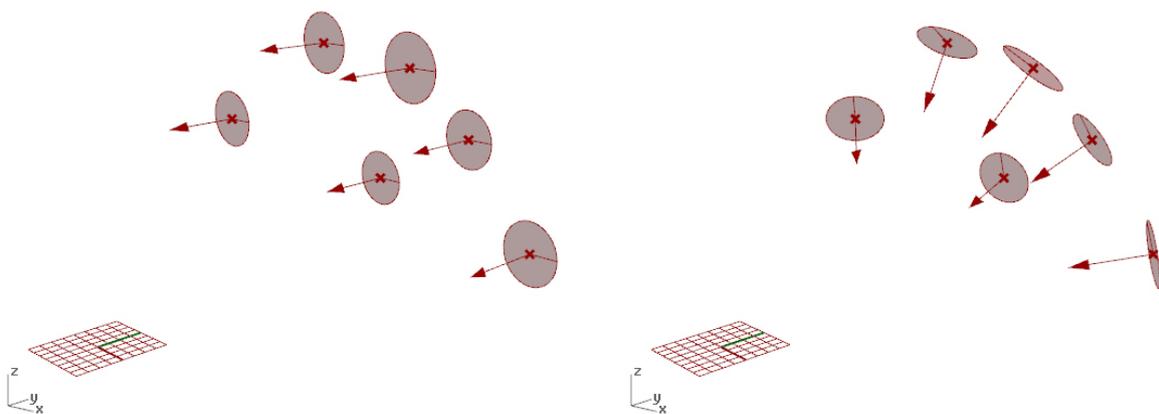
Após algumas reflexões sobre a observação dos resultados do mecanismo interagindo com o sistema criado, decidiu-se retornar ao sistema de variabilidade formal e alterar a orientação inicial das normais dos espelhos acústicos, estes foram orientados para o centro da platéia. Deste modo, apenas as grandes rotações tornariam a área receptora das reflexões externas às áreas de interesse, onde estavam concentrados os grupos de receptores, e o mecanismo compreenderia após poucas tentativas que as pequenas rotações eram mais interessantes. Antes desta decisão era necessário definir doze domínios para as penalidades, carregando o sistema, o software e o hardware, sendo eles: seis domínios para cada espelho acústico nos eixos X; e seis domínios para cada espelho acústico nos eixos Y.

A partir desta decisão, foi mais fácil restringir os limites de rotação ao inferirmos as penalidades. Para este experimento, a versão final possui apenas dois domínios de rotação: dos seis espelhos para o eixo X; e dos seis espelhos para o eixo Y.

Imagem 65:

Ajustes na orientação inicial dos espelhos acústicos.

Fonte: autora.



Desta maneira, manualmente definiu-se os intervalos de rotação para cada eixo, de acordo com os limites:

Eixo X $\{-0,1\pi, 0\pi\}$

Eixo Y $\{-0,04\pi, 0,04\pi\}$

Como o objetivo foi experimentar o método de algoritmos genéticos avaliando suas dificuldades de interagir com o mecanismo de instanciamento automático da forma, bem como a construção de: solução de inicialização; sistema de validação; construção do espaço de busca; função objetiva; e suas particularidades. Por este motivo, não foram experimentadas variações na população, probabilidade e reprodução, sendo utilizado as pré-definições do plugin Galápagos.

Imagem 66:

Rhinoceros e Grasshopper: simulação e resultados da função fitness.

Fonte: autora.

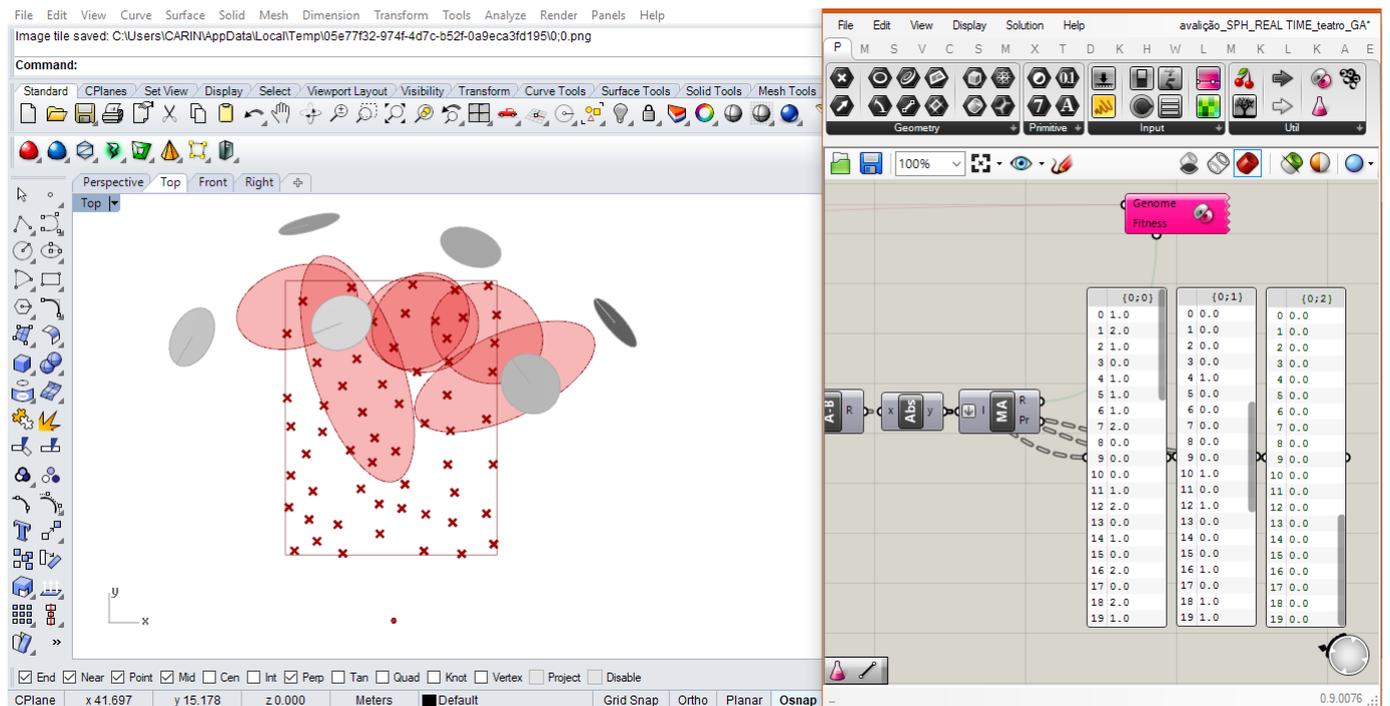
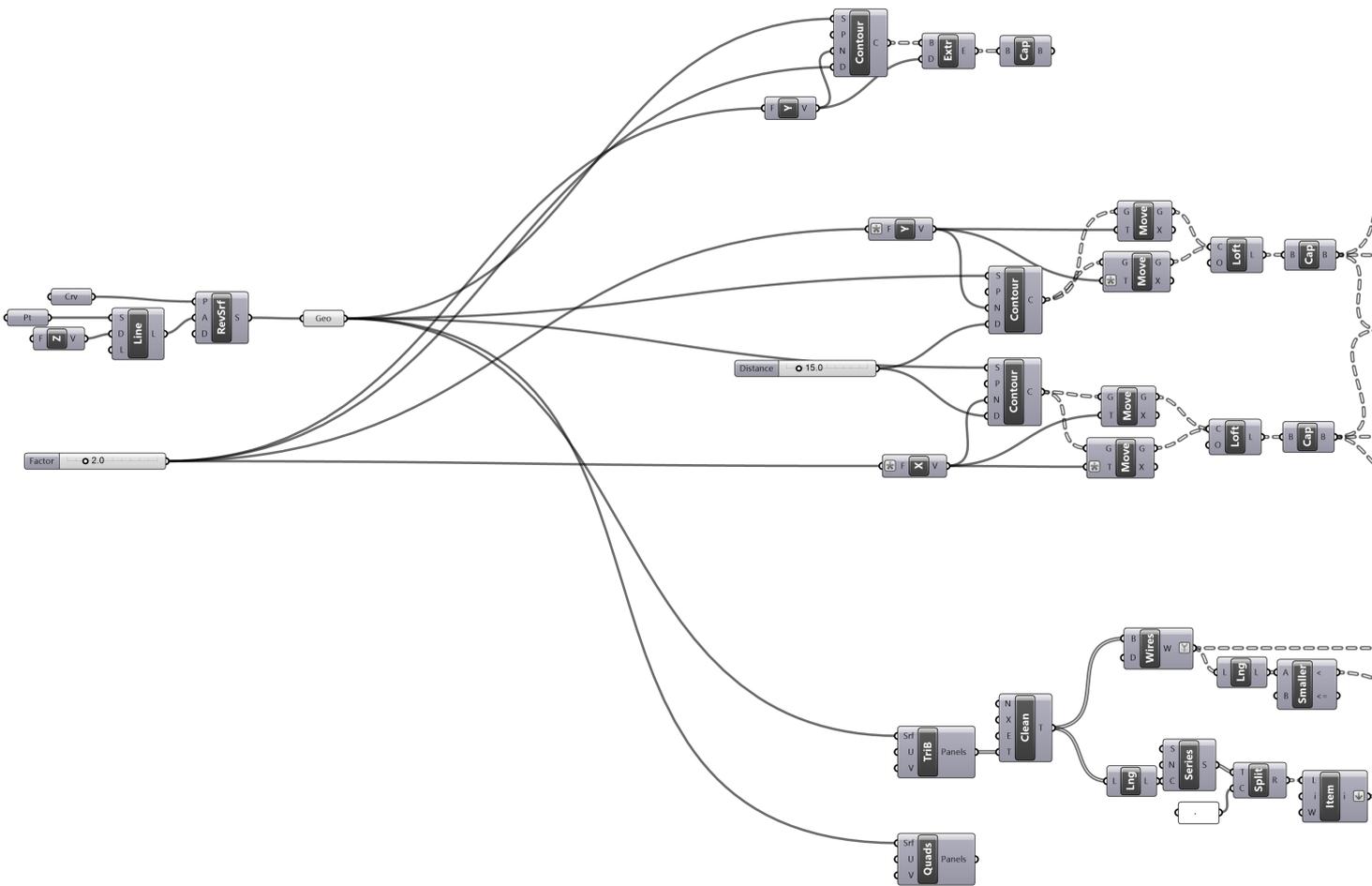


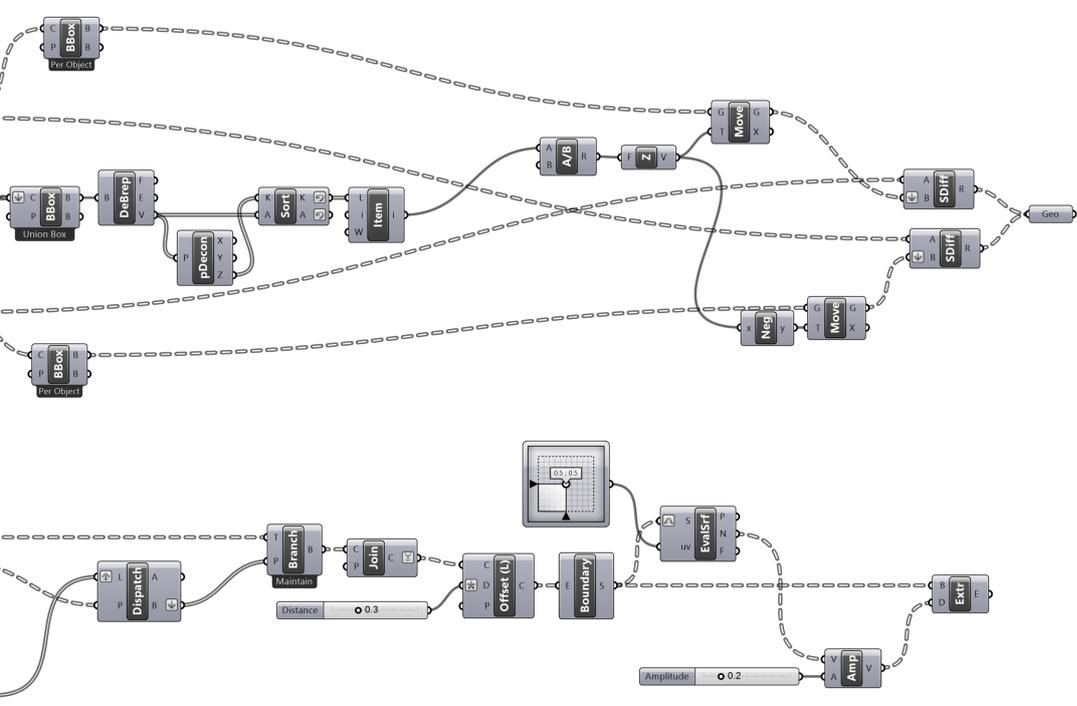
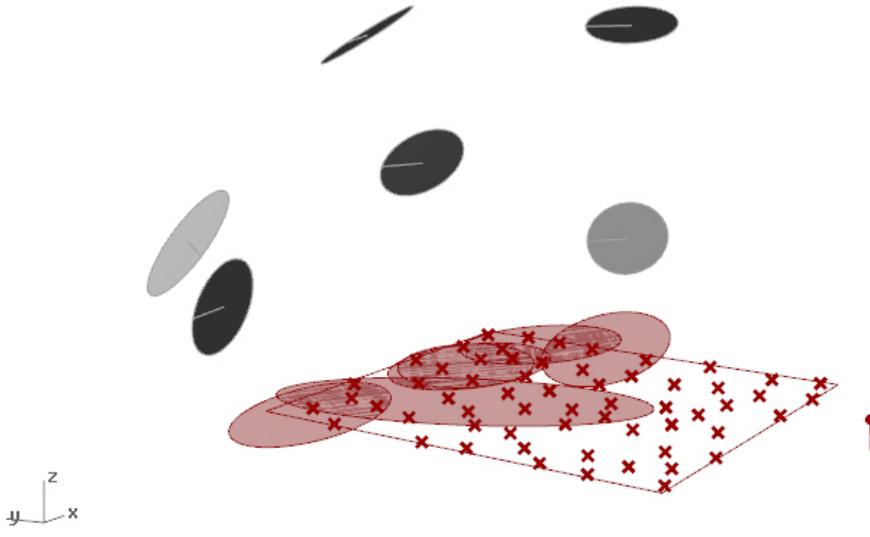
Imagem 67:

Solução formal encontrada pelo mecanismo.
Fonte: autora.

Imagem 68:

Código do experimento produzido com Grasshopper e Galápagos.
Fonte: autora.





III.2 Experimento 2: processo performativo formativo - paramétrico

III.2.1 PROPOSTA PROJETUAL

*“Um sistema é um conjunto de elementos heterogêneos (materiais ou não), de distintas escalas, que estão relacionados entre si, com uma organização que procura estrategicamente adaptar-se a complexidade do contexto e que constitui um todo que não é explicável pela mera soma das partes. Cada parte do sistema está em função de outra; não existem elementos isolados.” (MONTANER, 2008, p. 11)*³³

O escopo do projeto definido para a segunda experimentação é a construção de um sistema arquitetônico capaz de conduzir o som de maneira controlada e desejável, em espaço aberto, através de superfícies refletoras baseadas no estudo de curvas notáveis da acústica.

Além do aspecto acústico, o projeto busca explorar sistemas de condicionantes que operam com o processo formativo e permita o instanciamento – geração – contínuo da forma, onde é possível expandir a forma quando necessário, sem comprometer o desempenho acústico da forma inicial, de maneira a manter a qualidade do sistema. O interesse sobre a possibilidade de instanciamento contínuo da forma, é uma abstração sobre a questão da imprevisibilidade das relações espaciais que o projetista enfrenta durante o processo de projeto, quando se pretende prolongar a vida de sua obra. Esta proposta discute possíveis alternativas em projeto de sistema de relações espaciais construído com ferramentas paramétricas e algorítmicas.

³³ Citação traduzida pela autora, do espanhol: “Un sistema es un conjunto de elementos heterogéneos (materiales o no), de distintas escalas, que están relacionados entre si, con una organización intenta estrategicamente adaptarse a la complejidad del contexto y que constituye un todo que no es explicable por la mera suma de sus partes. Cada parte del sistema está en función de otra; no existen elementos aislados.”(MONTANER, 2008, p. 11).

O processo formativo, utilizado no projeto, é constituído por um sistema lógico de condicionantes, que relacionam e associam as geometrias internas da estrutura produzida. Diferente do experimento anterior, onde a geração da forma decorre de maneira automática a partir da interação com o mecanismo do Algoritmo Genético, neste experimento, a geração da forma sucede através da interação direta com este sistema de condicionantes, de maneira manual, onde se alteram os parâmetros e novos instanciamentos da forma são gerados. Este sistema de condicionantes foi pensado de modo que pudéssemos explorar uma liberdade de instanciamento contínuo da forma, e mesmo com o instanciamento inicial que cristaliza a estrutura, será possível expandi-la ao longo do tempo, para que novas instâncias formais sejam geradas.

Todo processo de projeto responde às questões de um espaço-tempo específico, respectivo ao momento em que o projeto é concebido. Ao longo do tempo, transformam-se as necessidades espaciais, e a forma construída quando cristalizada, precisa ser repensada para que possa se ajustar ao meio. Aprender a lidar com imprevisibilidade do futuro, para uma possível expansão, é um dos interesses que motivam os estudos sobre complexidade aplicada à forma construída; uma vez que as soluções reducionistas tornam a estrutura facilmente obsoleta. Para ultrapassar os limites do objeto construído e cristalizado, algumas correntes acreditam na evolução dos sistemas espaciais.

Será apresentado o processo de construção do ensaio, que se utiliza dos softwares Rhinoceros (versão 5.11 – 64 bits) e Grasshopper (versão 0.9.0076) para a

produção de relações formais que resultem em sistemas espaciais capazes de crescer e diminuir, diante às pressões do meio, sem perder as relações internas que garantem a boa condução do som. O ensaio se baseia no estudo de curvas notáveis da acústica e noções da geometria descritiva, para criar superfícies reflexivas elípticas de revolução.

III.2.2 PRÉ-EXPERIMENTO

Com o intuito de produzir uma estrutura cujas partes funcionassem como espelhos sonoros e conduzissem o som de maneira desejável, optou-se por trabalhar superfícies geradas através da transformação geométrica de curvas notáveis da acústica, duas curvas foram experimentadas nesta primeira etapa: elipse e parábola.

No estudo pré-experimental as curvas foram estudadas como figuras planas, desconsiderando a transformação geométrica da revolução.

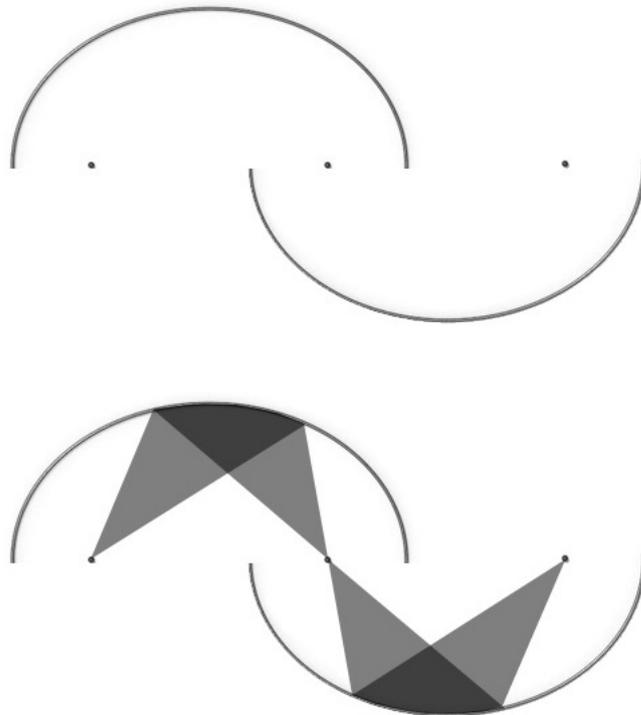
III.2.2.1 Primeira Modelagem:

Neste modelo, dois segmentos de elipses foram associados com a finalidade de compreender como poderia suceder a condução sonora, através do estudo dos raios sonoros. Foi imprescindível que as elipses compartilhassem um de seus focos, para que a condução ocorresse (Imagem 69).

Imagem 69:

Segmentos de elipses com focos compartilhados dando continuidade à condução sonora.

Fonte: autora.



Esta associação de curvas foi bastante satisfatória quanto sua potencialidade de condução sonora. Com este modelo, foi possível prever uma cadeia de segmentos de elipse, com focos compartilhados, associados de maneira que o som pudesse ser conduzido continuamente.

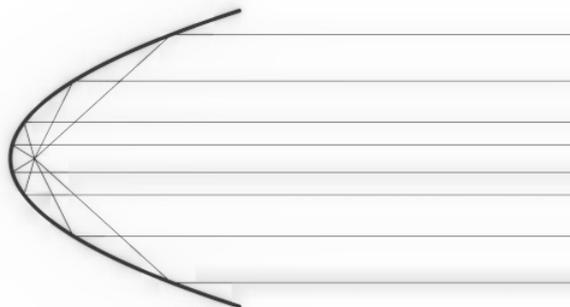
III.2.2.2 Segunda Modelagem:

Neste modelo foi explorada a propriedade acústica de uma superfície parabólica, onde os raios que sejam emitidos de seu foco e, ao incidir sobre sua superfície côncava, são refletidos paralelamente ao seu eixo principal, ou ainda no sentido oposto, onde raios paralelos ao seu eixo principal que incidam sobre sua superfície côncava sejam refletidos coincidentemente ao seu foco (Imagem 70).

Imagem 70:

Propriedade acústica da Parábola.

Fonte: autora.

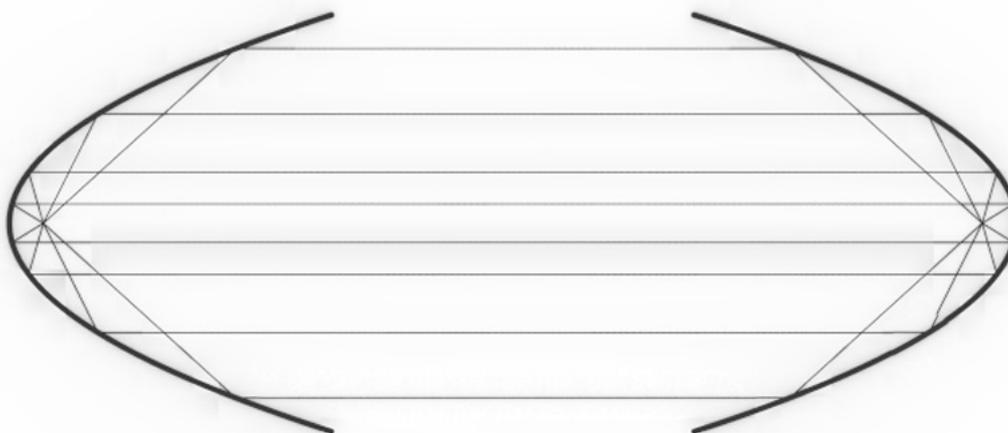


Considerando este fenômeno, inicialmente dois segmentos de parábolas foram associados de forma espelhada, coincidindo seus eixos principais. Assim, os raios sonoros emitidos do foco de uma das parábolas seriam recebidos pelo foco da segunda parábola (Imagem 71).

Imagem 71:

Associação de parábolas e estudo do som refletido, em sistema fechado.

Fonte: autora.



Este modelo de associação garante a condução do som apenas em um sistema fechado, não sendo possível associar nenhum outro segmento de parábola.

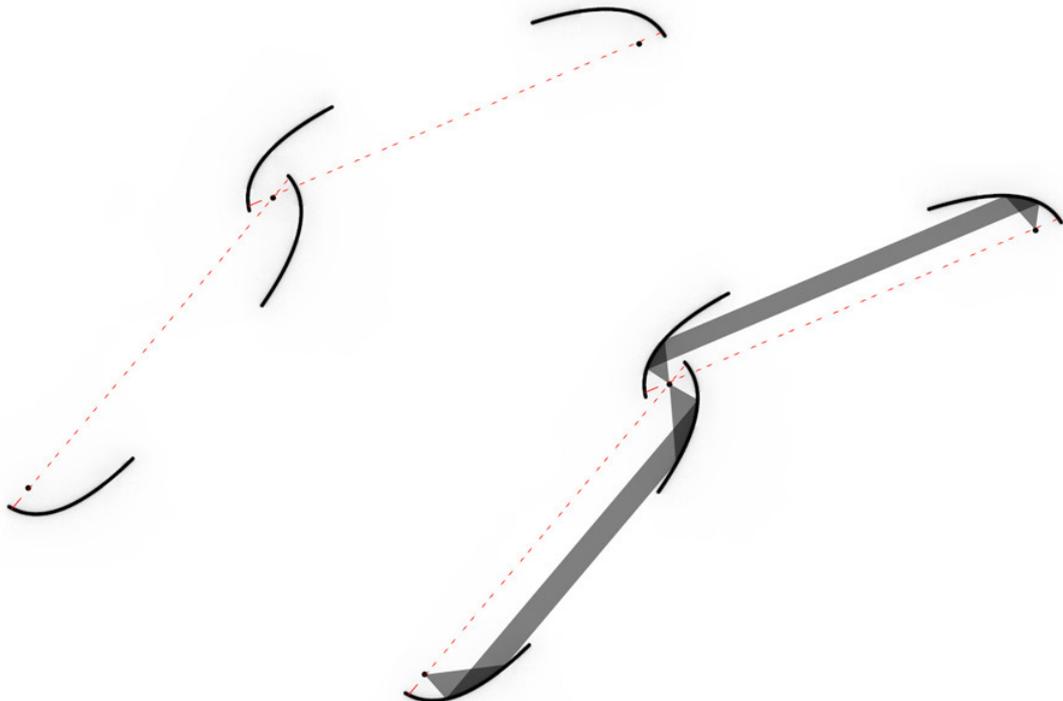
Para que se tornasse um sistema aberto foi estudado um segundo modelo de associação entre as curvas. Com a diminuição dos segmentos pela metade, a partir de seu eixo principal, percebeu-se que era possível associar uma terceira parábola que compartilhasse o foco com a segunda parábola, assim o som poderia ser conduzido à direção paralela ao eixo desta terceira parábola, como demonstra a **imagem 72**.

Desta maneira a condução do som poderia ser viabilizada, em um sistema espacial aberto.

Imagem 72:

Associação de parábolas e estudo do som refletido, em sistema aberto.

Fonte: autora.



III.2.2.3 Conclusão do pré-experimento

A partir dos estudos apresentados ponderou-se qual dos modelos seriam mais eficazes na condução sonora. A conclusão foi que ambos refletiam os raios de maneira desejável, e se estivéssemos tratando de ótica, é possível que qualquer uma das opções fossem igualmente eficazes, entretanto na acústica, para que o som seja recebido de maneira inteligível, todos os raios sonoros emitidos devem chegar ao mesmo tempo ao receptor, ou seja, a distância percorrida dos raios deve ser a mesma. Com isso, descartou-se a possibilidade de trabalhar com as parábolas, uma vez que os raios percorrem distâncias diferentes, e optou-se pelo sistema de associação de elipses.

III.2.3 O ALGORITMO

A partir da ideia de como a condução sonora ocorreria, começaram os estudos da construção do algoritmo e das relações paramétricas, que deveriam considerar sucessivos acréscimos de curvas, imaginando o crescimento da estrutura com flexibilidade direcional da cadeia de elipses.

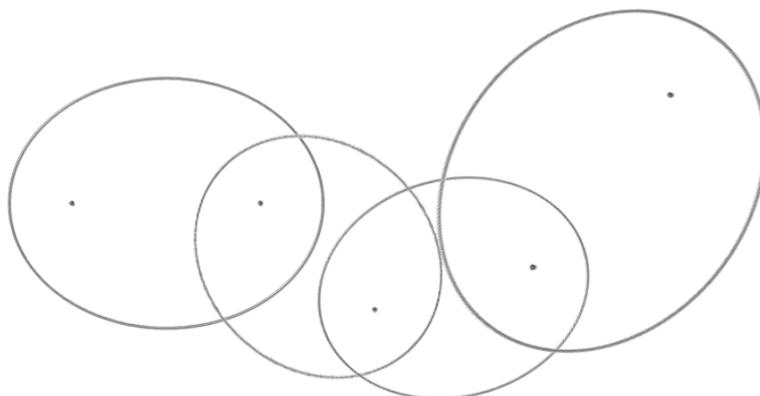
Percebeu-se que o posicionamento dos focos eram estratégicos para orientar a direção da cadeia de curvas, e conseqüentemente, a direção da condução do som. Desta maneira, os parâmetros espaciais dos focos (posição x e y) foram definidos como as variáveis do algoritmo, portanto as curvas deveriam ser geradas a partir do posicionamento de pontos no espaço, que representam os focos, e a cada

novo foco – ponto – inserido, uma nova elipse seria gerada, automaticamente pelo algoritmo. Assim, na inclusão de dois pontos, apenas uma elipse será criada, e na inclusão cinco pontos, quatro elipses serão criadas, a cada novo ponto uma nova elipse é instanciada – gerada (Imagem 73).

Imagem 73:

Cadeia de elipses produzida através de sistema de condicionantes.

Fonte: autora.



Para desenhar uma elipse a partir de seus focos, é necessário utilizar equação polar da curva. Conforme descrito no capítulo anterior (página 83), o software e plug-ins utilizados não possuem esta opção foi necessário utilizar a equação polar da curva descrita.

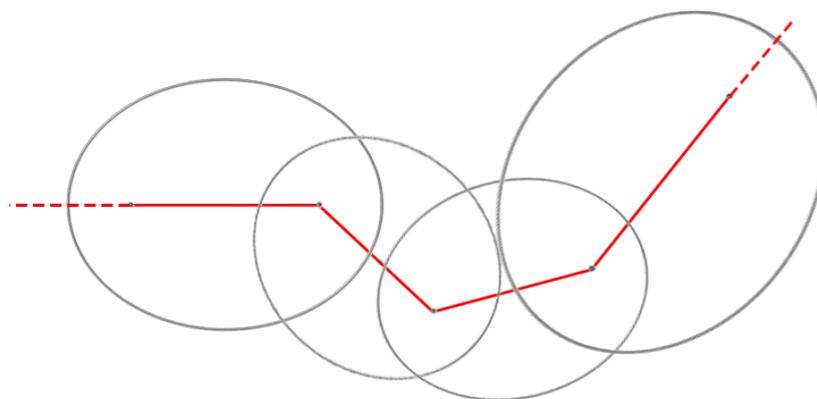
A excentricidade utilizada foi de $2/3$ do semi-eixo maior, este item não foi inserido como variável, a fim de tornar o algoritmo mais simples, e não pela real necessidade de manter a proporção entre as elipses.

A segmentação (Imagem 74) das curvas foi produzida com um objeto de corte gerado a partir de uma poli linha construída através da conexão dos focos, com as extremidades estendidas. Esta transformação criou dois segmentos de curva em cada elipse, o segmento a ser utilizado foi escolhido de maneira alternada entre o segmento ao lado direito e esquerdo no sentido da poli linha, os demais segmentos foram descartados, de modo que o som pudesse ser conduzido em “zig-zag”, sem barreiras (Imagem 75).

Imagem 74:

Segmentação de elipses.

Fonte: autora.



Assim o sistema de condicionantes descrito no algoritmo sucedeu da seguinte maneira:

- Criação da poli linha que conecta os pontos focais;
- Extensão das extremidades desta poli linha, de maneira que extrapole a área das elipses extremas;
- Segmentação das elipses nos pontos de interseção com a poli linha criada;
- Descarte alternado dos segmentos de elipse gerados.

Imagem 75:

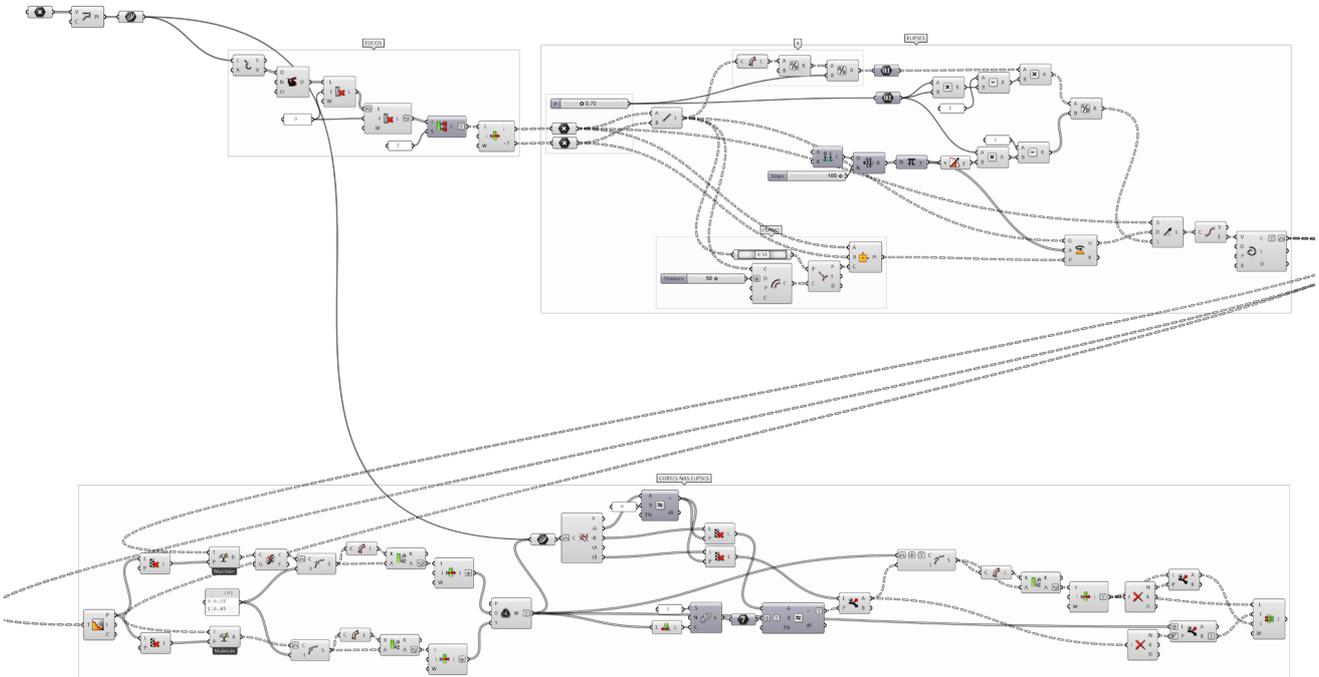
Condução sonora através
de cadeia de segmentos de
elipses

Fonte: autora.

**Imagem 76:**

Algoritmo produzido no Grasshopper.

Fonte: autora.



Após o estudo bidimensional do sistema, este foi substituído pelo tridimensional.

A associação geométrica das curvas permaneceu com a mesma lógica, entretanto antes de seccionar as elipses com a poli linha, as curvas foram seccionadas por seus respectivos eixos-maiores e sofreram a transformação geométrica da revolução em 180° , cujo eixo de revolução de cada elipse foi seu próprio eixo maior, gerando semi-elipsoides.

Parte do estudo bidimensional da seção das elipses foi mantido. Os pontos de interseção das poli linhas e elipses foram conectados, gerando uma corda para cada elipse. Cada corda foi transladada verticalmente na mesma dimensão de seu, criando o plano de corte desejado.

Ao serem seccionadas, duas superfícies foram criadas para cada metade de elipsóide, a escolha das superfícies ocorreu da mesma maneira que no modelo anterior bidimensional, alternadamente, para que a condução do som ocorresse sem barreiras.

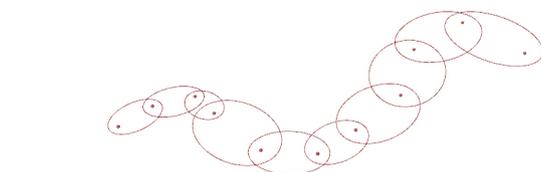
Assim o sistema de condicionantes final, descrito no algoritmo sucedeu da seguinte maneira:

- 1 Inserção sequencial de pontos como variáveis, representando os focos das elipses;

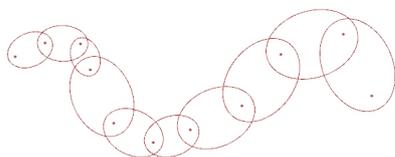
Imagem 77:

Inserção dos pontos e geração das elipses (itens 1 e 2).

Fonte: autora.



y, z, x

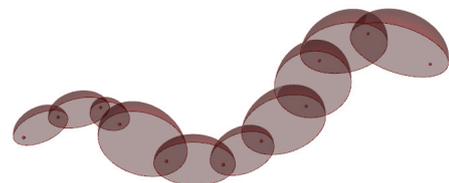


y, x

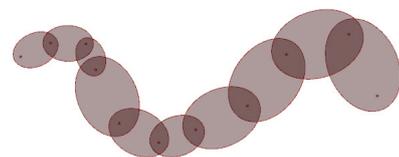
Imagem 78:

Revolução dos segmentos de elipse em 180° (itens 3 e 4).

Fonte: autora.



y, z, x



y, x

- 2 Geração das elipses através da variável dos pontos e da equação polar descrita, com excentricidade fixada em $2/3$ do semi-eixo maior (Imagem 77);
- 3 Seção das elipses por seus eixos maiores;
- 4 Transformação geométrica de revolução, em 180° das seções de elipses, considerando o eixo maior como eixo de revolução, gerando semi-elipsóides (Imagem 78);
- 5 Criação da poli linha que conecta os pontos focais;
- 6 Extensão das extremidades desta poli linha, de maneira que extrapole a área da elipses extremas;
- 7 Interseção da poli linha com as curvas elípticas, gerando pontos;
- 8 Criação de uma corda para cada elipse, ao conectar os pontos de interseção gerados no passo anterior;
- 9 Translação na direção do vetor Z das cordas de elipses, com mesma dimensão do comprimento da corda, gerando os planos de seção (Imagem 79);
- 10 Seção das semi-elipsóides com os planos;
- 11 Descarte alternado das superfícies geradas pela seção do passo anterior.

Imagem 79:

Translação das poli linhas de corte na direção do vetor Z (item 9).

Fonte: autora.

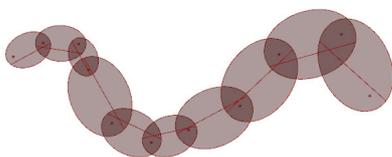
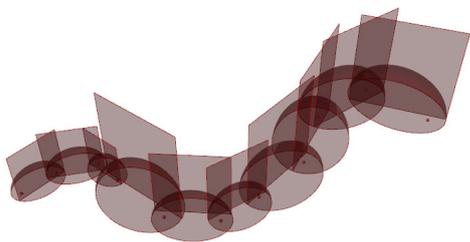
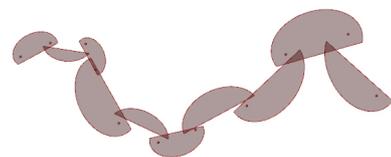
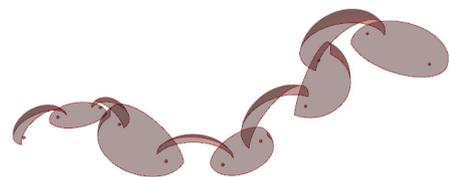
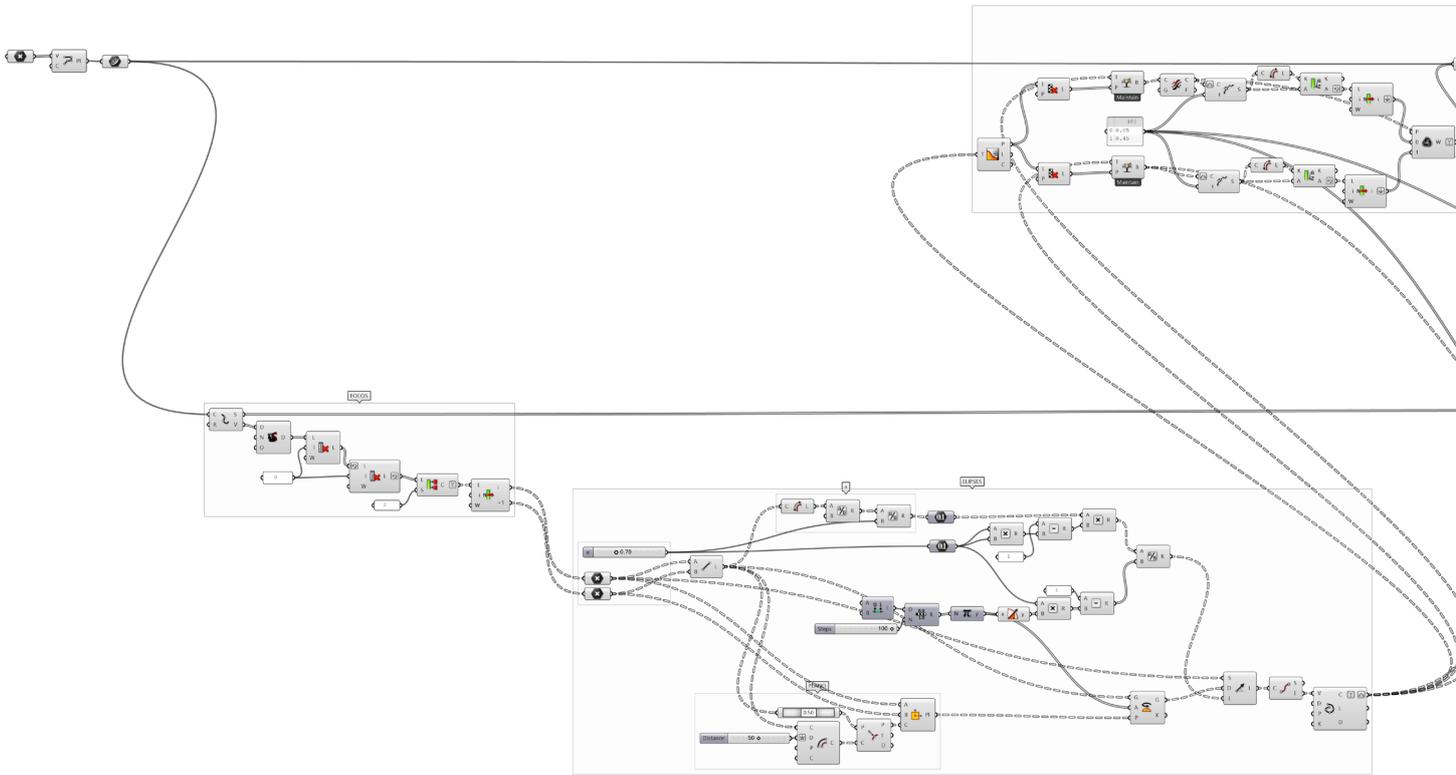
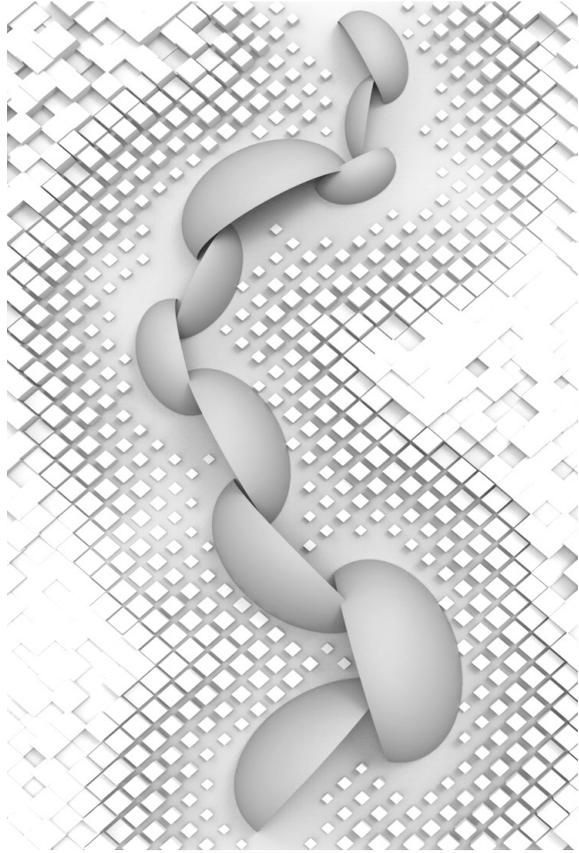


Imagem 80:

Seção das semi-elipsóides com os planos e descarte alternado (itens 10 e 11).

Fonte: autora.





CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao longo da pesquisa foram observado métodos computacionais de geração de forma arquitetônica, orientada pela performance técnica, com foco em acústica. O desenvolvimento do trabalho buscou construir um senso crítico sobre o tema nos campos teórico e prático, que geraram reflexões importantes para o prosseguimento da pesquisa. As principais considerações são:

- **O exercício de criar ferramentas** - teoria e prática sobre o uso da ferramenta computacional para gerar novas ferramentas de processo de projeto;
- **Ondas sonoras x raios sonoros** - o uso da teoria dos raios e suas implicações e possíveis desvios nos resultados obtidos;
- **Experimento 1 : performativo generativo** - Algoritmos Genéticos como método alternativo à geração da forma;
- **Tipos de instanciamento da forma** – as diferenças entre a proposta de instanciamento manual e contínuo (experimento 2) ao invés do instanciamento automático e único da forma (experimento 1).
- **Conclusão e novas direções para a pesquisa**

O exercício de criar ferramentas

“Temos que estar cientes de que as ferramentas existentes raramente estão produzindo novas soluções, mas apenas a busca por novas soluções está criando novas ferramentas.

Felizmente, nossas ferramentas se desenvolvem em um ritmo enorme, em parte porque o número de usuários explodiu na última década, mas principalmente porque cada vez mais eles começam a criar suas próprias ferramentas após uma curta fase de experimentação com as existentes. Isso leva a novas ideias. Mas então todos enfrentam os mesmos desafios ”.

(SCHEURER, 2013)

Os softwares para arquitetura tem se tornado cada vez mais complexos, e permitem de maneira intuitiva uma maior interação do usuário com o processo de geração de formas. Estes softwares mais recentes, por um lado exigem competência cognitivas, e por outro lado, comparado aos softwares que operam segundo o modelo CAD (OXMAN, 2005), dão maior liberdade ao projetista, que deixa de ser apenas usuário e passa a criar ferramentas projetuais a partir do uso da programação, forçando o arquiteto a lidar com um nível mais elevado de abstração para operar de maneira criativa sobre o processo de geração da forma.

Foi demonstrado, portanto, que o Design Computacional, de modo geral, não aumenta a capacidade criativa sobre o processo de projeto. Nos processos tradicionais – modelo baseado no papel (OXMAN, 2005), o arquiteto possui tal liberdade e capacidade de abstração, entretanto a capacidade da máquina em fazer cálculos e processos repetitivos com rapidez e precisão, potencializa tais processos de maneira que projetos cada vez mais complexos possam ser solucionados com maior controle e qualidade.

Ondas sonoras x raios sonoros

O modo aceito de prever o desempenho acústico, utiliza-se a simulação acústica geométrica. Trata-se de um conceito que pressupõe que o som viaja em raios, contendo energia sonora e perde energia – absorção – ou muda de direção – reflexão ou dispersão – à medida que interagem com as superfícies da sala.

“Essa abstração exclui a natureza ondulatória do som e, como resultado, há limitações sobre o que pode ser calculado.

Detalhes geométricos menores que o comprimento de onda do som são desnecessários e, de fato, foram mostrados que diminuem a precisão, portanto apenas grandes superfícies devem ser incluídas. Como esses programas calculam interseções de raios com superfícies, é necessário descrever (e desenhar) o projeto em malhas triangulares simples com poucos detalhes” (PETERS, 2013).

Segundo descrito por Brady Peters (2013), a teoria dos raios tem sido bastante utilizada para projetos em Design Computacional orientados pela acústica. Os ensaios práticos experienciados neste trabalho assim se procederam para o estudo geométrico acústico espacial. Segundo os objetivos propostos para os experimentos, de distribuição e condução sonora, não foi objeto de estudo e discussão a perda de energia por absorção nas reflexões, por este motivo não houve a necessidade de utilizar um plugin de cálculo pronto para o raio e energia sonora, e a construção do sistema vetorial, como descrito, para simulação dos raios demonstrou-se um solo mais fértil de investigação, pois todo o sistema foi elaborado ampliando a partir das relações geométricas vetoriais.

Experimento 1 : performativo generativo

O experimento teve como objetivo a investigação de um método existente, para que se pudesse construir um senso crítico sobre o mesmo, considerando as dificuldades de utilização, bem como a análise dos resultados obtidos.

Por ser um método produzido através de uma teoria - darwinista, o cumprimento das etapas foi produzida conforme o preenchimento dos requisitos, entretanto decorreu de maneira empírica, sendo muitas vezes necessário voltar atrás em algumas decisões, o que configura um processo não linear. Como por exemplo, foi no cumprimento da etapa da criação da variabilidade formal, onde foi chegou-se a criar dois sistemas para decidir qual gerava melhores resultados, ou até mesmo as considerações feitas no processo de decisão da função fitness, entre outras.

Apesar do exercício de explicitar as regras projetuais inferidas, exigido pelo computador, que para a parcela dos arquitetos que operam nos métodos tradicionais de projeto pode não ser tão evidente, ainda sim a etapa de criar sistema de variabilidade formal pode ser considerado um exercício que não demanda novos conhecimentos ao projetista. Entretanto, a transposição do problema e estratégias de solução para a linguagem matemática pode vir a ser um obstáculo aos que se aventurarem neste método.

Em termos gerais o experimento se demonstrou bastante relevante como investigação de um novo método de geração de forma comprometida diretamente com algum aspecto de escolha do projetista. O uso do método não elimina

qualquer responsabilidade sobre o projeto final, pertencente ao profissional que irá conduzir todo o funcionamento do processo. Conclui-se que as dificuldades de uso do método fazem sentido para projetos de patamar de complexidade mais elevado, que exigem uma precisão técnica dos resultados, mas que para garantir que a forma gerada cumpre com todas as particularidades, é importante a utilização de software de avaliação confiável, a fim de garantir que o usuário não tenha desconsiderado qualquer detalhe técnico relevante à qualidade do produto.

Tipos de instanciamento da forma

Ambos os ensaios experienciaram tipos diferentes de instanciamento da forma: sendo o primeiro, um instanciamento automático e único da forma – performativo evolutivo/algoritmos genéticos, onde o mecanismo oferece uma ou mais soluções que ele mesmo compreende como ótima, através de regras inferidas pelo profissional; e o segundo, um instanciamento manual e contínuo da forma – performativo formativo/paramétrico, onde para cada decisão de expansão da estrutura é possível gerar novas instâncias manualmente. Posto isto, surgem diversas observações, e os comentários se propõem comparar: primeiramente, as diferenças entre o instanciamento automático e o manual; e em sequência, as diferenças entre o instanciamento único e contínuo.

O instanciamento manual em relação ao instanciamento automático está mais próximo ao processo de projeto tradicional, sendo mais intuitivo ao profissional de arquitetura.

O instanciamento automático se dá através da utilização de um método específico, e por isso é necessário despende um tempo em produzir informações conforme exigido. No método manual, onde este pode construir uma lógica inteira de acordo com sua linha de pensamento, não há compromissos quanto as etapas a serem cumpridas. Ambos os resultados formais poder passar por uma etapa avaliativa da forma, se necessário assegurar algum desempenho técnico.

O instanciamento contínuo torna-se mais flexível às imprevisibilidades do meio, uma vez que permite que a forma da estrutura projetada seja definida segundo demanda e especificidades futuras do espaço. Por este motivo, considerando que o meio pode sofrer alterações, a flexibilidade do instanciamento contínuo pode ser uma estratégia eficaz. Entretanto, apesar da não cristalização total da forma, o instanciamento contínuo, assim como o instanciamento único – representado pelos Algoritmos Genéticos –, a cristalização ocorre de maneira parcial. Não é único, mas também é definitivo a medida que se cria um novo instanciamento, uma sequencia de cristalizações. Além disso, os dois meios não são capazes de lidar com problemas desconhecidos, visto que em ambos os experimentos, o problema e estratégia de solução são definidos mediante a produção dos sistemas.

A maneira como o segundo experimento foi produzido, o instanciamento contínuo pode ser uma estratégia interessante a ser explorada na arquitetura, mas sua qualidade estará diretamente associada ao reconhecimento do sistema pela comunidade onde esteja situado tal objeto, compreenda sua lógica e possa dar continuidade à expansão ou diminuição

da mesma, de maneira consciente. No experimento dado, a comunidade deve possuir conhecimentos sobre acústica e construção de superfícies de base elíptica.

Conclusão e novas direções para a pesquisa

As discussões teóricas levantadas sobre o uso do Design Computacional como alternativa ao processo de projeto permitiu uma visão crítica sobre os métodos emergentes, colaborando para a compreensão do que de fato é novo e o que é um resgate de antigas técnicas esquecidas pela prática arquitetônica e comercial. A partir de um senso crítico construído, as aplicações práticas das ferramentas de Algoritmos Genéticos e desenho paramétrico permitiu uma visão de como o estudo geométrico-acústico pode ser potencializado com o uso do computador.

Este trabalho abre possibilidades para novos rumos que esta pesquisa pode tomar, como:

a utilização de softwares avançados que permitem a análise da energia sonora que os raios carregam, a fim de inserir objetivos mais elaborados aos ensaios práticos, considerando a qualidade sonora das salas.

Quanto as discussões sobre instanciamento contínuo ou único, os experimentos foram concebidos de modo que o instanciamento contínuo produza uma série de cristalizações da forma, a flexibilidade está atrelada à expansão desta estrutura. Para continuidade da pesquisa, pode-se considerar a construção de sistemas que permitam a não cristalização da

arquitetura, com a robotização dos componentes acústicos. No caso do experimento dos algoritmos genéticos, inserir motores e processadores nos eixos de rotação dos espelhos acústicos poderia ser uma opção de produzir novas instâncias formais, alterando segundo demanda, os objetivos de distribuição sonora no espaço.

Saindo do campo da acústica, a universidade de Stuttgart está avançada em estudos que alteram continuamente a forma através do estudo das propriedades dos materiais, e alterações no ambiente, como humidade são capaz de alterar a forma sem o uso da robótica, apenas explorando estratégias inerentes à estrutura física do material, bem como o sentido das fibras e sua deformação com a presença ou ausência de humidade.

Uma outra direção pouco explorada neste trabalho, mas que a abstração sobre os diferentes tipos de instanciamento formal nos permite, é sobre o caráter social-cultural dos instanciamentos contínuos. O aprofundamento em técnicas culturais que permitam que o instanciamento contínuo da forma ocorra de maneira intuitiva e inovadora dentro de uma sociedade.

ANEXO

Em seguida será elucidado o processo de definir a função fitness – item III.1.2.3, referente à definição da função *fitness*. Segundo o problema proposto a platéia, constituída por 60 receptores, foi dividida em três diferentes grupos com objetivos diferentes em quantidade de primeiras reflexões sonoras que cada grupo deve receber. Entretanto, para simplificar a compreensão, a platéia será constituída por 6 receptores, e não será dividida em grupos, e cada receptor deverá receber apenas uma reflexão. A partir deste novo cenário simplificado, serão comentadas três situações hipotéticas, são elas:

Situação 1 - os seis receptores recebem respectivamente a quantidade de primeiras reflexões iguais a: quatro, zero, zero, zero, dois e zero (4, 0, 0, 0, 2 e 0);

Situação 2 - os seis receptores recebem respectivamente a quantidade de primeiras reflexões iguais a: dois, zero, dois, zero, dois e zero (2, 0, 2, 0, 2 e 0);

Situação 3 - os seis receptores recebem respectivamente a quantidade de primeiras reflexões iguais a: um, um, um, um, um e um (1, 1, 1, 1, 1 e 1).

Desta maneira, prosseguiremos com os três exemplos e discussões sobre a definição da função fitness, sendo:

a) No primeiro exemplo a função fitness foi produzida a partir da média do número de reflexões recebidas por cada um dos seis receptores, da média subtraí-se o número de reflexões desejadas:

$$\text{Situação 1 : } f(x) = 4 + 0 + 0 + 0 + 2 + 0 = 6/6 = 1 - 1 = 0$$

$$\text{Situação 2 : } f(x) = 2 + 0 + 2 + 0 + 2 + 0 = 6/6 = 1 - 1 = 0$$

$$\text{Situação 3 : } f(x) = 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 = 6/6 = 1 - 1 = 0$$

Para o mecanismo dos Algoritmos Genéticos as três soluções são semelhantes em relação ao desempenho, e consideradas ótimas. Entretanto, é visível a ineficiência da proposta, visto que: na primeira situação, um receptor chega a receber quatro reflexões, enquanto mais da metade dos receptores não recebem nenhuma reflexão, obtendo a média ótima de uma reflexão; na segunda situação, metade dos receptores recebem duas reflexões, enquanto a outra metade não recebe nenhuma, também obtendo a média ótima de uma reflexão; sendo que a solução ótima deveria ser representada apenas pela terceira situação, onde cada receptor recebe uma reflexão.

b) O segundo exemplo demonstra como as mesmas soluções apresentadas seriam validadas com a função fitness mais aprimorada. Foi calculada a soma das diferenças dos valores absolutos de reflexões recebidas e número de reflexões desejadas:

$$\text{Situação 1 : } f(x) = |(4-1)| + |(0-1)| + |(0-1)| + |(0-1)| + |(2-1)| + |(0-1)|$$

$$f(x) = |3| + |-1| + |-1| + |-1| + |1| + |-1|$$

$$f(x) = 3 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1$$

$$f(x) = 8$$

Situação 2 : $f(x) = |(2-1)| + |(0-1)| + |(2-1)| + |(0-1)| + |(2-1)| + |(0-1)|$
 $f(x) = |1| + |-1| + |1| + |-1| + |1| + |-1|$
 $f(x) = 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1$
 $f(x) = 6$

Situação 3 : $f(x) = |(1-1)| + |(1-1)| + |(1-1)| + |(1-1)| + |(1-1)| + |(1-1)|$
 $f(x) = 0 + 0 + 0 + 0 + 0 + 0$
 $f(x) = 0$

Para o mecanismo dos Algoritmos Genéticos as soluções um e dois – com resultados oito e seis, respectivamente – seriam devidamente descartadas, sendo apenas a terceira solução – com resultado igual a zero – considerada ótima.

c) O terceiro exemplo procura demonstrar um espectro mais nítido entre as diversas soluções geradas pelo mecanismo, visto que apenas o resultado da função é analisado pelo mecanismo. Esta demonstração pode ser bastante interessante quando o sistema não encontra uma solução ótima, ou essa seja considerada inviável por diversas motivações, e o projetista procura obter a melhor possível. Neste exemplo soma-se o dobro dos valores absolutos do resultado das diferenças entre o número de reflexões recebidas e número de reflexões desejadas por cada receptor:

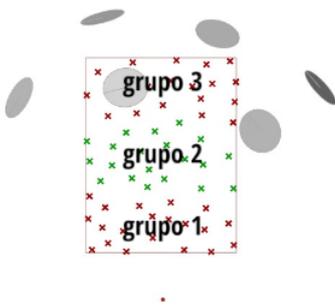
Situação 1 : $f(x) = 2x |(4-1)| + 2x |(0-1)| + 2x |(0-1)| + 2x |(0-1)| + 2x |(2-1)| + 2x |(0-1)|$
 $f(x) = 6 + 2 + 2 + 2 + 2 + 2$
 $f(x) = 16$

Situação 2 : $f(x) = 2x |(2-1)| + 2x |(0-1)| + 2x |(2-1)| + 2x |(0-1)| + 2x |(2-1)| + 2x |(0-1)|$
 $f(x) = 2 + 2 + 2 + 2 + 2 + 2$
 $f(x) = 12$

Situação 3 : $f(x) = 2x |(1-1)| + 2x |(1-1)|$
 $f(x) = 0 + 0 + 0 + 0 + 0 + 0$
 $f(x) = 0$

Comparado ao exemplo anterior, neste exemplo a diferença entre resultado das soluções um e dois foi intensificada, demonstrando de maneira mais definida a qualidade das soluções. Estes valores podem ficar mais distantes quando, ao invés de dobrar o valor dos resultados, os potencializamos. A solução ótima continua sendo consideradas ótima.

No caso da proposta em estudo, que considera três grupos com diferentes objetivos a função utilizada não foi multiplicada por nenhum fator, sendo definida da seguinte maneira:



$$|(a_1 - \mathbf{0})| + |(a_2 - \mathbf{1})| + |(a_3 - \mathbf{3})|$$

\downarrow \downarrow \downarrow
 n° reflexões **desejadas** por receptor do **grupo 1** n° reflexões **desejadas** por receptor do **grupo 2** n° reflexões **desejadas** por receptor do **grupo 3**

Onde:
 a_1 = n° de reflexões recebida por cada receptor do **grupo 1**
 a_2 = n° de reflexões recebida por cada receptor do **grupo 2**
 a_3 = n° de reflexões recebida por cada receptor do **grupo 3**

BIBLIOGRAFIA

- AISH, Robert. First build your tools. In: PETERS, Brady & PETERS, Terri. Inside Smartgeometry: Expanding the architectural possibilities of Computational Design. Trento: John Wiley & Sons, 2013. p. 36-49.
- BENTLEY, Peter. An Introduction to Evolutionary Design by Computers. In: Evolutionary Design by Computers. São Francisco: Morgan Kaufmann Publisher, 1999. p. 1-74.
- BOSIA, D. Long form and algorithm. In: Mathematic of Space, Architectural Design, vol. 81. Londres: John Wiley & Sons, 2011.
- BRAGANÇA, Luís; ALMEIDA, Manuela G. & Souza, Léa C. L. (2003) Bê-á-bá da acústica arquitetônica: ouvindo a Arquitetura. São Carlos: EdUFSCar, 2012.
- CARVALHO, Benjamin. Acústica Aplicada à Arquitetura. Rio de Janeiro: Livraria Freitas Bastos, 1967.
- CARVALHO, Régio Paniago (2006). Acústica Arquitetônica. Brasília: Thesaurus, 2010.
- CELANI, Gabriela et al. A gramática da forma como metodologia de análise e síntese em arquitetura. Caxias do Sul: Revista CCSO/UCS Conexão – Comunicação e Cultura, v. 5, n. 10, 2006.
- CELANI, Gabriela. Prefácio à edição brasileira. In: MITCHELL, William J. (1990) A lógica da arquitetura: projeto, computação e cognição. Campinas: Editora da Unicamp, 2008.
- COX, Trevor J. & D'ANTONIO, Peter (2004) Acoustic Absorbers and Diffusers: Theory, design and application. Oxford: Taylor & Francis Group e-book 2ed, 2009.
- DIMCIC, Milos. & KNIPPERS, Jan. Integration of FEM, NURBS and Genetic Algorithms in Free-Form Grid Shell Design. In: BERG, M. et al. Computational Design Modelling: Algorithm and applications. Berlim: Springer, 2011. p. 97-103
- EVEREST, F. Alton. Master Handbook of acoustics. _____: McGraw-Hill eBooks 4ed, 2001.
- GROSS, Mark. Design as exploring constraints. PhD thesis at Massachusetts Institute of Technology, 1985.
- HERZOG, Thomas. Performance form. In: KOLAREVIC, Branko. & MALKAWI, Ali. Performative Architecture: Beyond Instrumentality. Nova Iorque: Spon Press, 2005. p. 71-84
- KOLAREVIC, Branko. & MALKAWI, Ali. Performative Architecture: Beyond Instrumentality. Nova Iorque: Spon Press, 2005.

KOLAREVIC, Branko. Parametrics evolution. In: PETERS, Brady & PETERS, Terri. Inside Smartgeometry: Expanding the architectural possibilities of Computational Design. Trento: John Wiley & Sons, 2013. p. 50-59

LEACH, Neil. Parametrics explained. In: Next Generation Building. V. 1, n. 1, p. 33-42. _____, 2014.

LEATHERBARROW, David. Architecture's unscripted performance. In: KOLAREVIC, Branko. & MALKAWI, Ali. Performative Architecture: Beyond Instrumentality. Nova Iorque: Spon Press, 2005. p. 5-18

LEITÃO, António Menezes. Programação para Arquitetura. Lisboa: Universidade de Lisboa, 2016.

LOCKWOOD, E. H. A book of curves. Cambridge: Cambridge University Press, 1961.

MITCHELL, William J. (1990) A lógica da arquitetura: projeto, computação e cognição. Campinas: Editora da Unicamp, 2008.

OXMAN, Rivka. Theory and design in the first digital age. In: International Journal of Design Studies, Elsevier, vol. 27, n. 3, 2006. p. 229-265. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/28579013_Theory_and_design_in_the_first_digital_age

PETERS, Brady. The sound of smartgeometry. In: PETERS, Brady & PETERS, Terri. Inside Smartgeometry: Expanding the architectural possibilities of Computational Design. Trento: John Wiley & Sons, 2013. p. 112-121

PREISINGER, C. Linking Structure and Parametric Geometry. Archit Design, 83: 110-113. Doi: 10.1002/ad.1564, 2013.

RAHIM, Ali. Performativity: beyond efficiency and optimization in architecture. In: KOLAREVIC, Branko. & MALKAWI, Ali. Performative Architecture: Beyond Instrumentality. Nova Iorque: Spon Press, 2005. p. 177-191

SCHEURER, Fabian. Encoding Design. In: PETERS, Brady & PETERS, Terri. Inside Smartgeometry: Expanding the architectural possibilities of Computational Design. Trento: John Wiley & Sons, 2013. p. 186-195

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARTIGAS, J. B. V. Os caminhos da arquitetura moderna. São Paulo: Cosac Naify, 2004.
- BENJAMIN, Walter. A obra de arte na era de sua reprodutibilidade técnica. _____ : _____, 1955.
- BRANDÃO, E. Acústica de salas: projeto e modelagem. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 2016.
- CAPRA, Fritjof. As conexões ocultas. São Paulo: Editora Cultrix, 2002.
- CARPO, Mario. The alphabet and the algorithm. Cambridge: MIT Press, 2011.
- CARPO, Mario (ed). The digital turn in architecture: 1992-2012. Londres: John Wiley & Sons, Architectural Design Reader, 2013.
- CECCATO, Cristiano et al. Advances in architectural geometry 2010. New York: Springer Wien, 2010.
- COSTA, E. Acústica Técnica. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 2003.
- GÓMEZ, J.; KAHLE, E. & WULFRANK, T. Shaping concert halls. In: _____ ed ??? EuroRegio Conference Proceedings. EuroRegio: Conference. Porto: _____, 2016.
- IBERLINGS, Hans. Supermodernismo: arquitectura en la era de la globalización. Barcelona: Editorial Gustavo Gili, _____ .
- KILIAN, Axel. Design innovation through constraint modelling. In: _____ : 23th aCAADe Conference Proceedings, p. 671-678. eCAADe: Conferences. _____ : _____, 2005.
- KILIAN, Axel. Design exploration through bidirectional modeling of constraints. PhD thesis at Massachusetts Institute of Technology, 2006.
- KOLAREVIC, Branko. Architecture in digital age – design and manufacturing. Abington: Taylor & Francis Group, 2005.
- LAKATOS, Imre (1978). The methodology of scientific research programmes. Cambridge: Cambridge University Press, 1989.
- LEACH, Neil. Digital tool thinking: object oriented ontology versus new materialism. In: _____ : _____th aCAADe Conference Proceedings, p. 344-351. eCAADe: Conferences. Michigan: _____, 2016.
- LEGENDRE, G. Mathematics of space, Architectural Design, Profile n 212. Londres: John Wiley & Sons, 2011.

- LYNN, Greg (1993). Folding in Architecture. In: CARPO, Mario (ed). The digital turn in architecture: 1992-2012. Londres: John Wiley & Sons, Architectural Design Reader, 2013.
- LYNN, Greg. Archaeology of the digital. Santa Monica: Ram Publication, 2014.
- MAIA, S. C.; MEYBOOM, A. Interrogating interactive and responsive architecture. In: CELANI, G.; SPERLING, D. M.; FRANCO, J. M. S. Computer-Aided Architectural Design: The next city – New technologies and the future of the built environment: 16th CAAD Futures Conference Proceedings, p. 93-112. CAAD Futures. São Paulo: Springer, 2015.
- MENGES, Achim; SHEIL, Bob; GLYNN, Ruairi; SKAVARA. Fabricate 2017: Rethinking design and construction. Londres: UCL Press, 2017.
- MONEO, R. Paradigmas fin de siglo: Los noventa, entre la fragmentación y la compacidad. In: Arquitectura Viva n. 66. Madrid: Arquitectura Viva SL, 1999.
- MONKS, M. C. Audiooptimization: goal-based acoustic design. PhD thesis at Massachusetts Institute of Technology, 1999.
- MONTANER, J. M. Sistemas arquitectónicos contemporáneos. Barcelona: Editorial Gustavo Gili, 2008.
- PAYNE, A. & ISSA, R. The grasshopper primer. 2nd ed. E-book: Robert McNeel and Associates, 2009.
- PETERS, Brady & OLESEN, Tobias. Integrating sound scattering measurements in the design of complex architectural surfaces. In: _____: 28th aCAADe Conference Proceedings, p. 481-491. eCAADe: Conferences. _____: _____, ____.
- PICON, Antoine. Architecture and the virtual: towards a new materiality. In: REESER, A.; SCHAFER, A. (eds.) New technologies/new architectures, Praxis 6. Boston: Hogrefe & Huber Publishing Group, 2004. p 114-121.
- POLIA, G.(1975). A arte de resolver problemas: um novo aspecto do método matemático. Rio de Janeiro: Interciência, 1995.
- SCHUMACHER, P. Parametricism: a new global style for architecture and urban design. In: Digital Cities, Architectural Design, Profile n 79. Londres: John Wiley & Sons, 2008.
- VOMHO, Max et al. Robotic fabrication of acoustic brick walls. In: _____: ___th ACADIA Conference Proceedings, p 555-564. ACADIA: Conferences. _____: _____, 2014.
- WOLFRAM, S. A new kind of science. Champaign: Wolfram Media, 2002.

SITES VISITADOS

<http://www.iaacblog.com/programs/responsive-facade-dynamic-animation/>

<https://www.archdaily.com/270592/al-bahar-towers-responsive-facade-aedas>

<http://www.karamba3d.com>

<http://icd.uni-stuttgart.de/>

<https://selfassemblylab.mit.edu/>

<http://www.ita.arch.ethz.ch/archteclab.html>

<http://innochain.net/>

<http://gramaziokohler.arch.ethz.ch/>

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

<http://www.food4rhino.com/>

<http://www.designtoproduction.com/en/>

<https://iaac.net/>

<http://papers.cumincad.org/>

<http://www.serpentinegalleries.org/explore/pavilion>

<https://www.arup.com/>

<https://www.sinonimos.com.br/>

<https://translate.google.com.br/>

LISTA DE IMAGENS

Imagem 1:	Esquema genérico: símbolos bordas e ligação. Fonte: OXMAN, 2005.	p 31
Imagem 2:	Esquema genérico. Fonte: OXMAN, 2005.	p 31
Imagem 3:	Classe de software CAD. Fonte: OXMAN, 2005, p. 247.	p 32-33
Imagem 4:	Classe de software Formativa. Fonte: OXMAN, 2005, p. 250	p 32-33
Imagem 5:	Classe de software Generativa. Fonte: OXMAN, 2005, p. 255.	p 32-33
Imagem 6:	Classe de software Composta. Fonte: OXMAN, 2005, p. 261.	p 32-33
Imagem 7:	Subclasse Formativa baseada na performance. Fonte: OXMAN, 2005, p. 258.	p 32-33
Imagem 8:	Subclasse Generativa baseada na performance. Fonte: OXMAN, 2005, p. 259.	p 32-33
Imagem 9:	Design Digital e Computacional. Quadro demonstrativo evidenciando foco da pesquisa. Fonte: autora.	p 34
Imagem 10:	Estudos de topologia em objeto em transformação. Imagem produzida no software Rhinoceros Fonte: autora.	p 36
Imagem 11:	Exemplo de variação formal com classe Formativa Associativa: cúpulas geradas através de um mesmo sistema de condicionantes, com manipulação dos parâmetros de curva de perfil e divisão radial e vertical. Fonte: autora.	p 40-41
Imagem 12:	Exemplo de geração formal de superfície em utilizando classe Formativa Associativa: elaboração de sistema de condicionantes. Fonte: autora.	p 42
Imagem 13:	Foto das torres Al Bahar, projeto de Aedas Architects, em Abu Dhabi. Fonte: https://www.archdaily.com/270592/al-bahar-towers-responsive-facade-aedas .	p 43
Imagem 14:	Modelo do padrão de triângulos com alteração formal baseada na ação (movimento do sol). Fonte: https://www.archdaily.com/270592/al-bahar-towers-responsive-facade-aedas .	p 44
Imagem 15:	Modelos da fachada das torres Al Bahar, demonstrando alteração formal baseada na ação (movimento do sol). Fonte: https://www.archdaily.com/270592/al-bahar-towers-responsive-facade-aedas .	p 44

- Imagem 16:** Exemplo de vocabulário de formas em Gramática da Forma. Fonte: CELANI, 2006. p 46
- Imagem 17:** Exemplo de relações espaciais em Gramática da Forma. Fonte: CELANI, 2006. p 46
- Imagem 18:** Exemplo de regras em Gramática da Forma. Fonte: CELANI, 2006. p 46
- Imagem 19:** Pavilhão Serpentine Gallery, 2002 - Toyo Ito & ARUP. Fonte: www.serpentinegalleries.org. p 47
- Imagem 20:** Imagens de desenvolvimento do Pavilhão Serpentine Gallery, 2002 - Toyo Ito & ARUP. Fonte: BOSIA, 2011. p 48
- Imagem 21:** Desenvolvimento de regras de Gramática da forma para estudo da geração formal do Pavilhão Serpentine Gallery, 2002. R1, R2 e R3. Fonte: autora. p 48
- Imagem 22:** Aplicação de regras (R1, R2 e R3) em estudo da geração formal do Pavilhão Serpentine Gallery, 2002. Fonte: autora. p 49
- Imagem 23:** Aplicação da regra de finalização (R4) em estudo da geração formal do Pavilhão Serpentine Gallery, 2002. Fonte: autora. p 49
- Imagem 24:** Espaço de busca com soluções variadas representadas por pontos. Fonte: <http://www.grasshopper3d.com/profiles/blogs/evolutionary-principles>. p 50
- Imagem 25:** Espaço de busca com soluções selecionadas através da função fitness, representada por relevos no espaço de busca. Fonte: <http://www.grasshopper3d.com/profiles/blogs/evolutionary-principles>. p 50
- Imagem 26:** Espaço de busca com nova geração de soluções com herança representadas por pontos. Fonte: <http://www.grasshopper3d.com/profiles/blogs/evolutionary-principles>. p 51
- Imagem 27:** Espaço de busca com soluções refinadas através da função fitness. Fonte: <http://www.grasshopper3d.com/profiles/blogs/evolutionary-principles>. p 51
- Imagem 28:** Etapas de preenchimento dos elementos necessários à otimização estrutural com Algoritmos Genéticos: superfície, padrão retícula, suportes, cargas, material, secção estrutural, função objetiva, penalidades e definições do mecanismo. Fonte: DIMCIC & KNIPPERS, 2011. p 56

- Imagem 29:** Código desenvolvido com Grasshopper e Karamba, para geração da superfície inicial a ser inserida em mecanismo de Algoritmos Genéticos para otimização estrutural (modelo Generativo Evolutivo). Fonte: autora. **p 57**
- Imagem 30:** Modelo gerado do código da imagem anterior para geração da superfície inicial a ser inserida em mecanismo de Algoritmos Genéticos para otimização estrutural (Classe Generativa Evolutiva). Fonte: autora. **p 58**
- Imagem 31:** Modelo gerado baseado na performance, de estrutura condicionada ao desempenho estrutural de distribuição do fluxo de cargas (Classe Generativa Evolutiva). Fonte: autora. **p 59**
- Imagem 32:** Código desenvolvido com Grasshopper e Karamba, gerador da forma final baseada na performance, condicionada ao desempenho estrutural de distribuição do fluxo de cargas (Classe Generativa Evolutiva). Fonte: autora. **p 59**
- Imagem 33:** (A) visualização instantânea das regiões de compressão e rarefação da onda sonora no ar. (B) A região de compressão está ligeiramente à cima, e a de rarefação ligeiramente à baixo da pressão atmosférica. Fonte: EVEREST, 2001. **p 63**
- Imagem 34:** Comprimento de onda é a distância que a onda se propaga no intervalo de tempo necessário que a onda completa um ciclo. Fonte: EVEREST, 2001. **p 64**
- Imagem 35:** Direcionalidade da fonte sonora (voz humana). Fonte: BRAGANÇA et al, 2012. **p 66**
- Imagem 36:** A mesma energia sonora é distribuída sobre superfícies esféricas com acréscimo de área de acordo com o crescimento de r . A intensidade do som é inversamente proporcional ao quadrado da distância, a partir do ponto de origem da emissão. Fonte: EVEREST, 2001. **p 69**
- Imagem 37:** Representação gráfica dos fenômenos do campo reverberante: transmissão, absorção, reflexão e difração. Fonte: autora. **p 70**
- Imagem 38:** Estudo geométrico da teoria dos raios: representação do raio sonoro refletindo sobre superfície plana. Fonte: CARVALHO, B., 1967. **p 72**
- Imagem 39:** Estudo geométrico da teoria dos raios: representação do raio sonoro refletindo sobre superfície convexa. Fonte: CARVALHO, B., 1967. **p 72**
- Imagem 40:** Representação da reflexão do raio sonoro sob diferentes formas de espelho acústico: plano, côncavo, convexo e superfície irregular. Fonte: http://www.mariobon.com/Articoli_nuovi/001a_nozioni_di_base_fisica_del_suono.htm **p 74**

- Imagem 41:** Como se evita foco em seções transversais. Fonte: CARVALHO, B., 1967. p 74
- Imagem 42:** A resposta de um impulso sonoro em uma sala, e um típico exemplo de resposta sonora em uma sala de espetáculos. Fonte: COX, 2009. p 77
- Imagem 43:** Posições ao longo de um círculo. Fonte: LEITÃO, 2016. p 81
- Imagem 44:** Elipse: construções geométricas. Fonte: LOCKWOOD, 1961. p 82
- Imagem 45:** Construção da Elipse segundo equação polar, em código produzido no Grasshopper. Fonte: autora. p 83
- Imagem 46:** Transformações com a Elipse: possíveis formas de interesse acústico. Fonte: autora. p 83
- Imagem 47:** Parábola: propriedades da curva, aplicação na acústica. Fonte: CARVALHO, B. 1967. p 84
- Imagem 48:** Parábola: construções geométricas. Fonte: LOCKWOOD, 1961. p 84
- Imagem 49:** Parábola: propriedades da curva, aplicação na acústica. Fonte: CARVALHO, B. 1967. p 85
- Imagem 50:** Concha acústica. Fonte: CARVALHO, B. 1967. p 85
- Imagem 51:** Cúpula Panteon de Roma. Fonte: <http://panteondeagripa.blogspot.com/2013/04/el-panteon-de-agripa-el-panteon-de.html> p 87
- Imagem 52:** Estudo de automatização da teoria dos raios: representação da fonte emitindo o raio sonoro refletindo no espelho acústico plano e área de recepção do som refletido projetada no piso. Fonte: autora. p 101
- Imagem 53:** Automatização da teoria dos raios: sistema de condicionantes produzido em código no Grasshopper. Fonte: autora. p 102
- Imagem 54:** Automatização da teoria dos raios: vistas da representação da fonte emitindo o raio sonoro refletindo no espelho acústico plano e área de recepção do som refletido projetada no piso. Fonte: autora. p 103
- Imagem 55:** Vista 1: representação simplificada de sala de espetáculos com nove espelhos acústicos planos e áreas de recepção do som refletido projetadas no piso. Duas soluções formais geradas através da manipulação dos valores dos parâmetros. Fonte: autora. p 104

- Imagem 56:** Vista 2: representação simplificada de sala de espetáculos com nove espelhos acústicos planos e áreas de recepção do som refletido projetadas no piso. Duas soluções formais geradas através da manipulação dos valores dos parâmetros. Fonte: autora. **p 105**
- Imagem 57:** Sistema de condicionantes produzido em código no Grasshopper: representação simplificada de sala de espetáculos com nove espelhos acústicos planos e áreas de recepção do som refletido projetadas no piso. Fonte: autora. **p 106**
- Imagem 58:** Sistema de condicionantes produzido em código no Grasshopper: código de automatização da teoria dos raios com fonte de emissão sonora, espelho acústico convexo e área de recepção do som refletido projetada no piso. Fonte: autora. **p 108**
- Imagem 59:** Visualização no Rhinoceros de código produzido no Grasshopper: representação simplificada da teoria dos raios com fonte de emissão sonora, espelho acústico convexo e área de recepção do som refletido projetada no piso. Fonte: autora. **p 109**
- Imagem 60:** Divisão da platéia em três grupos com objetivos diferentes. Fonte: autora. **p 110**
- Imagem 61:** Montagem do modelo inicial com fonte, platéia e espelhos acústicos. Fonte: autora. **p 111**
- Imagem 62:** Ajustes no sistema de transformação da inclinação dos espelhos acústicos. (1) instâncias vetoriais para a normal do espelho. (2) eixos X e Y para rotação. Fonte: autora. **p 112**
- Imagem 63:** Definição da função fitness. Fonte: autora. **p 114**
- Imagem 64:** Rotação do espelho acústico nos eixos X e Y. Fonte: autora. **p 115**
- Imagem 65:** Ajustes na orientação inicial dos espelhos acústicos. Fonte: autora. **p 116**
- Imagem 66:** Rhinoceros e Grasshopper: simulação e resultados da função fitness. Fonte: autora. **p 117**
- Imagem 67:** Solução formal encontrada pelo mecanismo. Fonte: autora. **p 118**
- Imagem 68:** Código do experimento produzido com Grasshopper e Galápagos. Fonte: autora. **p 119**
- Imagem 69:** Segmentos de elipses com focos compartilhados dando continuidade à condução sonora. Fonte: autora. **p 123**
- Imagem 70:** Propriedade acústica da Parábola. Fonte: autora. **p 124**

Imagem 71:	Associação de parábolas e estudo do som refletido, em sistema fechado. Fonte: autora.	p 124
Imagem 72:	Associação de parábolas e estudo do som refletido, em sistema aberto. Fonte: autora.	p 125
Imagem 73:	Cadeia de elipses produzida através de sistema de condicionantes. Fonte: autora.	p 127
Imagem 74:	Segmentação de elipses. Fonte: autora.	p 128
Imagem 75:	Condução sonora através de cadeia de segmentos de elipses. Fonte: autora.	p 129
Imagem 76:	Algoritmo produzido no Grasshopper. Fonte: autora.	p 129
Imagem 77:	Inserção dos pontos e geração das elipses (itens 1 e 2). Fonte: autora.	p 130
Imagem 78:	Revolução dos segmentos de elipse em 180° (itens 3 e 4). Fonte: autora.	p 130
Imagem 79:	Translação das poli linhas de corte na direção do vetor Z (item 9). Fonte: autora.	p 131
Imagem 80:	Seção das semi-elipsóides com os planos e descarte alternado (itens 10 e 11). Fonte: autora.	p 131
Imagem 81:	Sistema de condução acústica com solução formal em instanciamento contínuo. Fonte: autora.	p 132
Imagem 82:	Algoritmo produzido no Grasshopper para Rhinoceros. Fonte: autora.	p 133
CAPA:	EXTRUDING BODIES, Wallwave vibration (2012). Fonte: http://loriscecchini.com/photo_11712772.htm	