

PROCESSOS INTEGRADOS DE MODELAÇÃO, ANÁLISE E OTIMIZAÇÃO DE PROJETOS NA AEC

Exploração de ferramentas de suporte à
prototipagem digital

JOÃO DIOGO CALHEIROS BRITO

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM CONSTRUÇÕES

Orientador: Professor Doutor João Pedro da Silva Poças Martins

Coorientador: Engenheiro João Luís Lima Cabral Tavares de Lima

JUNHO DE 2014

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2013/2014

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2013/2014 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2014.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

À memória da minha Mãe

Sucesso é ir de fracasso em fracasso sem perder o entusiasmo

Winston Churchill

AGRADECIMENTOS

Começo por agradecer ao Professor João Poças Martins, na qualidade de meu orientador científico, pelo interessante desafio proposto e por toda a disponibilidade demonstrada, assim como por todos os conhecimentos e orientações transmitidas ao longo de todo o trabalho. O seu interesse e apoio foram fundamentais para a concretização desta dissertação.

Agradeço igualmente ao meu coorientador, Engenheiro João Lima da empresa bimTEC, pelo interesse, ideias e sugestões demonstradas ao longo destes meses, que me permitiram explorar novos caminhos e contribuíram, sem dúvida, para o enriquecimento do trabalho.

Uma palavra de agradecimento a todos os colaboradores da empresa bimTEC, pela hospitalidade e altruísmo com que me acolheram durante o desenvolvimento deste trabalho. Um especial agradecimento ao Luís Oliveira, cujo apoio e sugestões durante o trabalho me auxiliaram na concretização do trabalho.

Aos meus amigos, companheiros de luta nos bons e nos maus momentos, e a todos os meus colegas, um grande obrigado!

Um agradecimento a toda a minha família, em especial ao meu Pai e a minha Avó, por todo o apoio, paciência e compreensão demonstrada em todos os momentos.

Agradeço à Mariana, pela compreensão, apoio e carinho que sempre demonstrou.

Um grande obrigado a todos por tornarem possível cumprir mais uma importante etapa da minha vida!

RESUMO

A crescente exigência por edifícios eficientes, sustentáveis e ambientalmente conscientes tem fomentado práticas inovadoras, sustentadas nos recentes avanços tecnológicos. Ferramentas computacionais de simulação e análise de desempenho, otimização matemática e fabricação digital têm suscitado interesse no setor da construção como forma de modelar, simular e testar os edifícios em ambiente virtual. Hoje em dia, o setor começa a entender um modelo digital, não apenas como uma representação tridimensional, mas também como um processo de prototipagem dos seus edifícios. Quanto mais alargadas e melhoradas forem as possibilidades para prever, ensaiar e avaliar o comportamento dos edifícios logo desde a fase de conceitualização, maior será o seu potencial de sucesso global.

As novas tecnologias digitais têm estimulado novas metodologias de projeto em que o desempenho tem um papel primordial. Neste contexto, recentemente surgiu o Projeto Orientado pelo Desempenho (POD) que se pretende ajustar aos desafios que se colocam ao setor. Esta metodologia foca a prototipagem digital, colocando o desempenho como um fator central no processo de projeto.

Neste trabalho é discutida a pertinência da modelação paramétrica como ferramenta para a obtenção expedita de alternativas de projeto. A combinação desta com análises e otimizações de desempenho formam o suporte computacional do POD. Analisa-se a relação entre o desempenho obtido para cada solução e a complexidade multidisciplinar que a sua avaliação envolve. Utilizam-se casos práticos e obras exemplificativas para demonstrar a aplicação destes conceitos e metodologia.

Na exploração dos conceitos e ferramentas digitais de suporte ao POD, é apresentado um caso de estudo, focado na vertente estrutural, que pretende analisar o potencial desta metodologia nas práticas da AEC. O caso de estudo utiliza ferramentas digitais, que interagem de forma integrada, baseando a geração de soluções em critérios objetivos de desempenho. Partindo duma construção estratégica do protótipo digital, é possível manipula-lo com base em *feedbacks* de desempenho, que por sua vez alimentam o processo evolutivo de otimização, criando um processo gerativo. Esta metodologia enfatiza a consideração multidisciplinar, logo desde a fase de exploração conceitual, que potencie decisões mais informadas e edifícios de desempenho melhorado.

A equipa de projeto, num contexto multidisciplinar, tem um papel fundamental na obtenção e avaliação das soluções. Por um lado, o POD é bastante flexível e adaptável, uma vez que facilita a exploração e avaliação de diversos cenários. Por outro, todo o processo é completamente dependente das capacidades de cada projetista para formalizar e interpretar o problema.

O POD centra-se na fase conceitual, baseado na criação em protótipos digitais simples e contextualizados, que, no entanto, estão mal preparados para a execução e produção. Deste modo, a metodologia utiliza ferramentas de interoperabilidade com *softwares* BIM, de modo a traduzir os resultados para um ambiente vocacionado para a sua correta execução e fabricação.

PALAVRAS-CHAVE: Projeto Integrado, Modelação Paramétrica, Desempenho, Otimização, Prototipagem.

ABSTRACT

The growing demand for efficient, sustainable and environmentally conscious buildings has encouraged innovative practices, supported by recent technological advances. Computational tools for simulation and performance analysis, mathematical optimization and digital fabrication have raised the interest of AEC industry as a way to model, simulate and test buildings in a virtual environment. Nowadays, the industry begins to understand a digital model, not only as a three-dimensional representation, but also as a prototyping process of buildings. The more extended and improved the possibilities to predict, test and evaluate the behavior of buildings are, since the conceptual phase, the greater is the potential for overall success.

New digital technologies have promoted new design methodologies where performance plays a key role. In this context, recently emerged the Performance-based Design, which aims to fit the challenges that industry is facing. This design methodology focuses on digital prototyping, placing performance as central factor in the design process.

This work discusses the relevance of parametric modeling as a tool for obtaining prompt design alternatives. Combining this with analysis and performance optimizations create the computational basis of Performance-based Design. It is analyzed the relationship between the performance obtained for each solution and the multidisciplinary complexity that involves its evaluation. Practical cases and illustrative projects are used to demonstrate the application of these concepts and methodology.

A case study focused on the structural design is presented for the exploration of the concepts and digital tools of Performance-based Design, which aims to analyze the potential of this methodology in the practices of the AEC industry. The case study uses digital tools that interact simultaneously, generating solutions based on measurable performance criteria. Starting from a strategic construction of digital prototype is possible to manipulate it based on performance feedbacks, which in turn feed the evolutionary optimization process, creating a generative process. This methodology emphasizes multidisciplinary consideration since the conceptual phase, fostering more informed decisions and improved building performance.

The project team, in a multidisciplinary context, plays a key role in generation and evaluation of solutions. On the one hand, the Performance-based Design is flexible and adaptable, since it facilitates the exploration and evaluation of diverse scenarios. On the other, the whole process is completely dependent on the capabilities of each designer to formalize and interpret the problem.

The Performance-based Design focuses on conceptual phase, based on the creation of simple and contextualized digital prototypes, which, however, are ill prepared for execution and production. Thus, this methodology uses interoperability tools to translate the results to BIM software environment in order to achieve its correct execution and fabrication.

KEYWORDS: Integrated Design, Parametric Modeling, Performance, Optimization, Prototyping.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS i

RESUMO iii

ABSTRACT v

1 INTRODUÇÃO 1

1.1. ENQUADRAMENTO 1

1.2. OBJETIVOS DO TRABALHO 5

1.3. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO 5

2 MODELAÇÃO PARAMÉTRICA 7

2.1. ENQUADRAMENTO GERAL E PERSPETIVA HISTÓRICA 7

2.2. MODELAÇÃO PARAMÉTRICA COMO PROCESSO GERATIVO 10

2.3. MODELAÇÃO PARAMÉTRICA COMO PROCESSO COLABORATIVO 13

2.4. INTEGRAÇÃO DA MODELAÇÃO PARAMÉTRICA NO CONTEXTO BIM 15

2.5. FERRAMENTAS DE MODELAÇÃO PARAMÉTRICA 19

3 TÉCNICAS EVOLUCIONÁRIAS DE OTIMIZAÇÃO DE PROBLEMAS 21

3.1. ENQUADRAMENTO GERAL 21

3.2. APLICAÇÃO DA COMPUTAÇÃO EVOLUCIONÁRIA NA AEC 23

3.3. PRÓS E CONTRAS DOS ALGORITMOS EVOLUCIONÁRIOS 24

3.4. COMPUTAÇÃO EVOLUCIONÁRIA 24

3.4.1. ALGORITMOS GENÉTICOS APLICADOS À COMPUTAÇÃO 24

3.4.2. DESCRIÇÃO GENÉRICA DO ALGORITMO GENÉTICO 25

3.4.3. ANATOMIA DOS *GENERIC SOLVERS* 30

3.4.3.1. Função *fitness* 30

3.4.3.2. Mecanismo de seleção 35

3.4.3.3. Mecanismo de recombinação 37

3.4.3.4. Mecanismo de mutação 40

3.4.4. ALGORITMO DE ARREFECIMENTO SIMULADO 41

3.4.5. ALGORITMOS EVOLUCIONÁRIOS MULTI-OBJETIVO 42

4 PROJETO ORIENTADO PELO DESEMPENHO	45
4.1. ENQUADRAMENTO GERAL	45
4.2. FRAMEWORK DE APLICAÇÃO DO PROJETO ORIENTADO PELO DESEMPENHO	47
4.3. OBRAS PROEMINENTES NO DOMÍNIO DO PROJETO ORIENTADO PELO DESEMPENHO	48
4.3.1. GREATER LONDON AUTHORITY HEADQUARTERS	48
4.3.2. COBERTURA DA ESTAÇÃO DE METRO DA PRAÇA GARIBALDI.....	49
4.3.3. AEROPORTO INTERNACIONAL BAO'AN	51
4.4. CASO PRÁTICO DE APLICAÇÃO	53
4.4.1. PROBLEMA 1 – OTIMIZAÇÃO DA FLECHA	53
4.4.2. PROBLEMA 2 – OTIMIZAÇÃO DA FLECHA E MASSA.....	59
5 CASO DE ESTUDO	65
5.1. DESCRIÇÃO E MOTIVAÇÃO	65
5.2. CONSTRUÇÃO DO MODELO	66
5.3. ANÁLISE DE DESEMPENHO	69
5.3.1. CONDIÇÕES INICIAIS.....	71
5.3.2. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA.....	72
5.3.3. ANÁLISE E OTIMIZAÇÃO DE DESEMPENHO	73
5.4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS	75
6 CONCLUSÃO	85
6.1. CONCLUSÕES GERAIS	85
6.2. DESAFIOS FUTUROS	87
BIBLIOGRAFIA	89
ANEXOS	95
A1. PROBLEMA DA COBERTURA PARAMÉTRICA – DEFINIÇÃO GRASSHOPPER	96
A2. CASO PRÁTICO DE APLICAÇÃO: PROBLEMA 1 E PROBLEMA 2 – DEFINIÇÃO GRASSHOPPER ...98	
A3. CASO DE ESTUDO – DEFINIÇÃO GRASSHOPPER	103

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 - Diagrama de enquadramento da metodologia proposta neste trabalho.....	4
Figura 2.1 - À esquerda uma curva de Bézier de 3º grau, cuja aglutinação por partes origina uma <i>spline</i> como ilustrado à direita.....	8
Figura 2.2 - Museu Guggenheim, Bilbao, Espanha, 1997, F. Gehry.....	8
Figura 2.3 - Aeroporto Internacional Bao'an, Shenzhen, China, 2011, M. Fuksas; (Renderização de Fuksas Studio).....	8
Figura 2.4 - Esquerda: Maquete de gesso feita por H. Isler; Direita: Wyss Garden Centre, Solothurn, Suíça, 1962, H. Isler.....	9
Figura 2.5 - Esquerda: <i>The Biosphere</i> (76m de diâmetro), Montreal, Canada, 1967, B. Fuller; Direita: <i>Multihalle</i> , Mannheim, Alemanha, 1975, F. Otto.....	9
Figura 2.6 - Esquerda: Ponte Skylink, Frankfurt, Alemanha, 2011, Bollinger + Grohmann; Direita: Análise FEM da Ponte.....	13
Figura 2.7 - Museu dos Transportes, Glasgow, Reino Unido, 2011, Zaha Hadid Architects e Buro Happold; Pormenor da estrutura treliçada que criou oportunidades colaborativas entre arquitetos e engenheiros estruturais.....	14
Figura 2.8 - Comparação entre a abordagem tradicional de projeto (acima) e a nova abordagem colaborativa <i>Optioneering</i> (abaixo).....	15
Figura 3.1 - Processo de conceção de projetos utilizando as tecnologias digitais: 1. Idealização; 2. Iteração; 3. Análise; 4. Visualização; 5. Documentação; 6. Fabricação.....	23
Figura 3.2 - Esquema do <i>loop</i> básico de um AE.....	26
Figura 3.3 - Relação entre um espaço físico bidimensional e o terreno <i>fitness</i> tridimensional resultante.....	26
Figura 3.4 - Terreno <i>fitness</i>	27
Figura 3.5 - Geração zero: Terreno <i>fitness</i> povoado aleatoriamente.....	27
Figura 3.6 - Indivíduos com melhor desempenho na geração zero.....	28
Figura 3.7 - Geração 1.....	28
Figura 3.8 - Caminho dos genomas descendentes do genoma representado pelo ponto preto, em busca da maximização do seu <i>fitness</i>	29
Figura 3.9 - Bases de atração à volta das três potenciais soluções ótimas.....	29
Figura 3.10. Esquema da Cobertura Paramétrica e respetiva sombra na configuração base.....	30
Figura 3.11 - Direção dos raios solares incidentes em relação ao sistema coordenado XYZ.....	30
Figura 3.12 - Cubo que delimita a variação dos vértices da cobertura.....	31
Figura 3.13 - Exemplo de genoma maximizante: cobertura plana.....	32

Figura 3.14 - Exemplo de genoma maximizante: cobertura <i>free-form</i>	32
Figura 3.15 - Genoma de configuração não maximizada.....	32
Figura 3.16 - Gráfico bidimensional do terreno <i>fitness</i> da cobertura paramétrica.....	33
Figura 3.17 - Representação gráfica de um terreno <i>fitness</i> com ótimo local.....	33
Figura 3.18 - Problemas devido a uma base de atração fraca.....	34
Figura 3.19 - Problemas com terreno <i>fitness</i> sem pressão.....	35
Figura 3.20 - Problemas com terreno <i>fitness</i> caótico.....	35
Figura 3.21 - Seleção Isotrópica.....	36
Figura 3.22 - Seleção Exclusiva.....	36
Figura 3.23 - Seleção Tendenciosa.....	37
Figura 3.24 - Mapa Genómico.....	38
Figura 3.25 - Mapas genómicos: a) Acoplamento com indivíduos próximos (incestuoso); b) Acoplamento com indivíduos distantes (zoófilo); c) Agrupamento em subespécies de genomas; d) Acoplamento equilibrado.....	39
Figura 3.26 - Da esquerda para a direita: Cruzamento Coalescente; Mistura Coalescente; Mistura Preferencial Coalescente.....	40
Figura 3.27 - Gráfico Genómico.....	40
Figura 3.28 - Gráfico Genómico: a) Mutação de Pontos; b) Inversão de Pontos.....	41
Figura 3.29 - Esquema do <i>loop</i> básico do algoritmo de arrefecimento simulado.....	42
Figura 3.30 - Algoritmo de arrefecimento simulado num problema de busca do máximo global.....	42
Figura 3.31 - Exemplo de fronteira de Pareto numa análise multi-objetivo.....	43
Figura 3.32 - Interface do <i>plug-in</i> Octopus.....	44
Figura 4.1 - <i>Framework</i> de aplicação do projeto orientado pelo desempenho.....	48
Figura 4.2 - Greater London Authority Headquarters, Londres, Reino Unido, 2002.....	49
Figura 4.3 - Cobertura da Estação de Metro da Praça Garibaldi, Nápoles, Itália, 2015.....	50
Figura 4.4 - Análise de desempenho de um indivíduo específico em <i>software</i> FEM.....	50
Figura 4.5 - Aeroporto Internacional Bao'an, Shenzhen, China, 2011, M. Fuksas.....	51
Figura 4.6 - Tipos de painéis, com abertura variável.....	52
Figura 4.7 - Folha de cálculo Excel para mapeamento e coordenação da abertura dos painéis.....	52
Figura 4.8 - Acima: Agrupamento por cores dos 20 tipos de painéis resultantes; Abaixo: Resultado da aplicação final, mostrando os diferentes graus de abertura ao longo a fachada.....	52
Figura 4.9 - Duas configurações possíveis para o <i>mezzanine</i>	53
Figura 4.10 - Construção paramétrica do modelo.....	54
Figura 4.11 - Montagem do modelo Karamba para análise estrutural.....	54

Figura 4.12 - Mezzanine de 6 x 4.17 [m]. a) Análise do modelo no Karamba e opções de visualização do modelo; b) Visualização do modelo deformado – escala de deformação 20x; c) Visualização dos deslocamentos das secções em gradação de cores – escala de deformação 20x.....	55
Figura 4.13 - Otimização estrutural com Galapagos: Gene – Comprimento (m), Função <i>fitness</i> – Deslocamento máximo (m).....	55
Figura 4.14 - Condições iniciais prescritas para o algoritmo genético do Galapagos.....	56
Figura 4.15 - Resultados obtidos após otimização com o Galapagos.....	56
Figura 4.16 - Solução ótima: 5 x 5 [m].....	57
Figura 4.17 - Valores de desempenho estrutural da solução ótima retirados do Karamba.....	57
Figura 4.18 - Tradução e exportação do modelo para ambiente BIM com o GeometryGym, através do formato IFC.....	58
Figura 4.19 - Modelo importado para o Autodesk Revit, através do <i>add-in</i> GeometryGym.....	58
Figura 4.20 - Adaptação do <i>framework</i> de aplicação do Projeto Orientado pelo Desempenho ao caso prático abordado.....	59
Figura 4.21 - Definição paramétrica do modelo.....	60
Figura 4.22 - Definição do problema de otimização em Octopus: definição dos parâmetros, objetivos e condição fronteira.....	61
Figura 4.23 - Resultados da otimização Octopus.....	61
Figura 4.24 - Amostra representativa do espectro de soluções da fronteira de Pareto.....	62
Figura 5.1 - Caso base considerado para o desenvolvimento do modelo.....	65
Figura 5.2 - Coordenadas dos pontos base para a definição paramétrica.....	65
Figura 5.3 - Estruturação dos <i>scripts</i> Grasshopper para coordenação geométrica do modelo.....	66
Figura 5.4 - Manipulação geométrica do modelo: quatro configurações possíveis e respetivos valores paramétricos.....	67
Figura 5.5 - Subdivisão do modelo em famílias de elementos estruturais.....	68
Figura 5.6 - Família dos Anéis: Subdivisão da família por tipos de secção atribuídas.....	69
Figura 5.7 - Família das Diagonais: Subdivisão da família por tipos de secção atribuídas.....	69
Figura 5.8 - Extrato da base de dados de materiais e respetivas propriedades mecânicas utilizadas pelo Karamba.....	70
Figura 5.9 - Ações consideradas.....	70
Figura 5.10 - Condições de apoio consideradas.....	70
Figura 5.11 - Tipos de secções a atribuir a cada família, retiradas da biblioteca de secções Karamba.....	71
Figura 5.12 - Processo iterativo de otimização.....	72
Figura 5.13 - Componente <i>Optimize Cross Section</i> do <i>plug-in</i> Karamba: Legenda de <i>inputs</i> e <i>outputs</i>	74
Figura 5.14 - Resultados da otimização Octopus: à esquerda geração 5; à direita geração 30.....	75

Figura 5.15 - Visualização e numeração dos resultados da fronteira de Pareto.....	76
Figura 5.16 – Opções de visualização de resultados no Karamba. À esquerda: deslocamentos nodais. À direita: percentagem de utilização dos elementos.....	76
Figura 5.17 – Interface do <i>plug-in</i> Superb Lyrebird: a) <i>Inputs</i> geométricos possíveis em Grasshopper; b) Componente em Grasshopper; c) Componente em Autodesk Revit.....	79
Figura 5.18 – Tradução de elementos Grasshopper em famílias Revit. Caso dos prumos inferiores da solução 7.....	80
Figura 5.19 – Modelo exportado para Autodesk Revit.....	81

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 - Ferramentas de interoperabilidade entre Rhinoceros/Grasshopper e Autodesk Revit.....	18
Quadro 2.2 - Principais ferramentas de modelação paramétrica disponíveis atualmente.....	20
Quadro 4.1 - Valores dos parâmetros e respetivos valores de desempenho estrutural das soluções selecionadas.....	63
Quadro 5.1 - Resultados das soluções da fronteira de Pareto: Parâmetros e Objetivos.....	77
Quadro 5.2 - Secções atribuídas pelo otimizador de secções nas soluções da fronteira de Pareto.....	78

ABREVIATURAS

AE – Algoritmo Evolucionário

AEC – Arquitetura, Engenharia e Construção

AG – Algoritmo Genético

API – *Application Programming Interface*

BIM – *Building Information Modeling*

CAD – *Computer Aided Design*

CAM – *Computer Aided Manufacturing*

CE – Computação Evolucionária

CNC – Controlo Numérico Computorizado

FEM – *Finite Element Method*

GS – *Generic Solver*

IC – Indústria da Construção

IFC – *Industry Foundation Classes*

NURBS – *Non-Uniform Rational Basis Spline*

POD – Projeto Orientado pelo Desempenho

SI – Sistema Internacional

TIC – Tecnologias da Informação e Comunicação

GLOSSÁRIO

Benchmarking - “Processo contínuo e sistemático que permite a comparação das performances das organizações e respetivas funções ou processos face ao que é considerado “o melhor nível”, visando não apenas a equiparação dos níveis de performance, mas também a sua ultrapassagem.” (Comissão Europeia, 2002). O *benchmarking* tem hoje uma aplicação mais ampla, que extravasa já o domínio organizacional.

Coalescência - É um modelo de retrospectiva da genética populacional. Faz uma abordagem genealógica de modo a fazer uma aglutinação dos genes compartilhados por uma dada população com os seus ancestrais.

Edifício - Neste trabalho é entendido como qualquer produto da indústria da construção.

Estocástico - Que tem origem em eventos aleatórios. Por exemplo, o lançamento de um dado.

Evolutionary solver – *Generic solver* que aplica algoritmos evolucionários para a resolução de problemas.

Free-form - É um conceito que descreve o desenvolvimento da forma independente de limitações das geometrias matemáticas básicas (quadrado, paralelepípedo, etc.).

Generic solver - Ferramenta informática formulada para lidar com, praticamente, qualquer classe de problemas matemáticos. Geralmente são usados para a otimização de problemas.

Genetic pool ou *Gene-pool* - É o conjunto de genes ou informação genética em qualquer população de uma dada espécie. Quanto maior for a *Genetic-Pool* maior será a diversidade genética.

Meta-heurística - Qualquer técnica que descobre novas soluções, a partir da experiência ganha de soluções anteriores, pode ser classificada como uma técnica meta-heurística.

Protótipo - É um modelo que serve como aproximação inicial do produto final. O protótipo é construído, testado e trabalhado até se atingir uma solução satisfatória, a partir da qual o produto final pode ser desenvolvido. Este tipo de modelos adequa-se a cenários em que não são conhecidos *à priori* todos os requisitos de projeto, servindo como base para ensaios, simulações e análises conducentes à satisfação destes requisitos.

Stakeholders - Partes interessadas/envolvidas em todo o ciclo construtivo.

Trade-off - Define uma situação em que há conflito de escolha. Implica uma ponderação de fatores que não são atendíveis ao mesmo tempo, isto é, o ganho num implica perda(s) no(s)outro(s).

1 INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO

A capacidade computacional para representar e analisar modelos tridimensionais de edifícios aumentou significativamente nas últimas décadas. Mais recentemente, a propagação dos modelos de informação para a construção, geralmente notados por BIM (*Building Information Modeling*), criou um novo paradigma na geração, gestão, tratamento e transferência da informação dentro do setor AEC (Arquitetura, Engenharia e Construção).

A IC (Indústria da Construção) é, talvez, a única que produz em quantidade, mas que não pode produzir em massa. O contexto geográfico, climático ou socioeconómico tornam cada edifício um produto único. Além da tecnologia BIM, a crescente exigência por edifícios mais eficientes tem fomentado o setor a explorar o potencial de inovação oferecido pelos avanços tecnológicos. Aspectos como a simulação e análise de desempenho, técnicas de otimização matemática e processos de fabricação digital têm começado a suscitar interesse como forma de modelar e ensaiar os edifícios em ambiente virtual.

As novas tecnologias digitais têm vindo a alterar o modo como os engenheiros e arquitetos interagem com os seus projetos. Hoje em dia, o setor começa a entender um modelo digital, não apenas como uma representação tridimensional, mas também como um processo de prototipagem dos seus edifícios. Quanto mais alargadas e melhoradas forem as possibilidades para prever e simular o comportamento dos edifícios, ao longo das fases iniciais do projeto, maior será o potencial de sucesso global destes.

Tal como noutras indústrias, um protótipo é criado com o propósito de testar, ajustar e aperfeiçoar um conceito em diversos contextos, antes de partir para uma formulação com intenções de produção, ou seja, definitiva. A modelação paramétrica tem-se mostrado bastante efetiva neste domínio, porque possibilita a criação de modelos flexíveis e adaptáveis a critérios pré-estabelecidos. Recentemente, começou a ser possível aliar à modelação paramétrica ferramentas de análises de desempenho, otimização e fabricação digital. A utilização combinada destas ferramentas possibilita a estruturação do modelo digital de forma a incrementar a eficiência global dos edifícios projetados. Além disto, começa já a ser possível a integração em ambiente BIM, o que permite utilizar estas ferramentas de forma combinada e integrada.

As ferramentas de modelação paramétrica aliadas à simulação de desempenho e técnicas de otimização estão a fazer emergir novas metodologias de projeto. Embora a utilização destas ferramentas seja ainda pouco expressiva, também é verdade que cada vez mais os *stakeholders* começam a perceber e explorar o seu potencial. Assim, um dos objetivos deste trabalho passa por investigar as possibilidades atualmente permitidas pelas ferramentas digitais para criar protótipos digitais guiados por intenções de desempenho dos edifícios.

O projeto em ambiente virtual tem criado condições para estreitar o trabalho colaborativo, envolvendo os vários *stakeholders* logo nas fases preliminares do projeto. O envolvimento de equipas multidisciplinares fomenta a consideração de aspetos tradicionalmente negligenciados nas fases embrionárias. A incorporação de vários domínios do conhecimento permite que a equipa avalie mais soluções e sob diferentes perspetivas, que aquelas que são consideradas no processo tradicional, fomentando a prototipagem digital (Fischer, M., 2006).

O processo tradicional de projeto tende a integrar critérios de desempenho apenas em fases relativamente avançadas deste. As fases preliminares, geralmente, focam-se apenas em critérios limitados e pouco objetivos (como critérios estéticos e funcionais). Os critérios de desempenho dos edifícios, como os que se relacionam com aspetos de engenharia, são apenas avaliados em fases posteriores. Em contradição com este processo de pós-racionalização dos conceitos arquitetónicos, por parte da engenharia e da construção, a envolvência multidisciplinar criou uma nova metodologia de projeto, o *Performance-based Design* – Projeto Orientado pelo Desempenho (POD). Este tem vindo a contribuir para projetos mais coordenados e otimizados, e que tipicamente, são guiados por intenções de eficiência, avaliação multidisciplinar e otimização de desempenho (Turrin, M. [et al.], 2011).

O POD pretende combinar, numa metodologia integrada, a modelação paramétrica, a simulação e análise de desempenho e a otimização multidisciplinar, de forma a criar um protótipo digital que se adapte a requisitos de comportamento definidos pela equipa de projeto. Esta metodologia abrange ainda a integração do modelo final em ambiente BIM.

Esta metodologia dá grande relevância à fase concetual do projeto. É nesta fase que há lugar à exploração de várias soluções para a concretização do projeto. As decisões tomadas nesta fase têm grande impacto no desenrolar do restante processo de projeto, e, conseqüentemente, no ciclo de vida dos edifícios. Deste modo, alargar o conjunto de critérios a avaliar logo desde a fase inicial, permite reduzir o investimento em soluções de fraco desempenho e canalizar esforços para as melhores soluções.

Neste contexto, as ferramentas de modelação paramétrica baseadas em *softwares* 3D CAD, como o Rhinoceros, têm sido as plataformas base do POD. Estes *softwares* oferecem interfaces abertas de programação visual (como o Grasshopper no caso do Rhinoceros), que possibilitam a geração de modelos paramétricos. Além das capacidades paramétricas, estas ferramentas permitem a sua customização através de um conjunto de *plug-ins*, que estendem as suas capacidades nativas. Estes *plug-ins*, maioritariamente desenvolvidos por terceiros, permitem já a incorporação de simulações de desempenho, interoperabilidade com vários sistemas (incluindo BIM), ligação com processos CAM e máquinas CNC, utilização de técnicas de otimização de problemas, entre outras potencialidades. Isto confere a estas ferramentas grande flexibilidade e adaptabilidade à grande maioria dos projetos na AEC.

A criação de modelos parametricamente definidos possibilita a incorporação de processos gerativos de modelação – *generative design*. Este processo permite substituir a ideia de modelo estático, típica dos modelos CAD e BIM não paramétricos, por modelos dinâmicos. Isto é, modelos que respondem a alterações geométricas, em função de critérios de desempenho definidos pelo projetista. Incorporar o desempenho como uma “força” capaz de gerar e modificar o modelo estimula o projetista a considerar e avaliar várias alternativas de projeto. Deste modo, os processos gerativos permitem que o projetista especifique os seus conhecimentos técnicos em forma de código paramétrico. A flexibilidade que este processo permite, tem a capacidade para fomentar novas ideias e libertar a criatividade do seu autor. Sendo este um processo de externalização de conhecimentos técnicos, este deve ser compreendido, portanto, como um processo altamente dependente das capacidades percetivas e cognitivas do projetista, que deve simultaneamente manipular e interpretar o modelo, tendo sempre uma visão crítica dos resultados obtidos (Kolarevic, B., 2003b).

As técnicas de otimização de problemas baseadas em algoritmos evolucionários têm-se mostrado bastante eficientes na resolução da grande maioria das classes de problemas matemáticos. A utilização de ferramentas de simulação e análise computacional, em conjunto com técnicas de otimização, permite que vários critérios de desempenho sejam, simultaneamente, analisados e classificados, em função dos objetivos de projeto, tirando partido de processos gerativos. Desta forma, é possível obter o espectro de soluções que satisfazem os objetivos definidos. Na posse destes dados, a equipa de projeto pode, então, avaliar e comparar diversas soluções, e optar pela que, globalmente, melhor se encaixe nos objetivos do projeto.

A aplicação de processos integrados para a modelação, análise e otimização de projetos na AEC depende da disponibilidade de ferramentas computacionais que os suportem. Neste contexto, alguns profissionais têm-se focado na criação de ecossistemas digitais (Davis, D. e Peters, B., 2013). Estes ecossistemas são um conjunto de ferramentas que interagem entre si, permitindo a criação de *workflows* digitais flexíveis e adaptados às exigências de cada projeto em particular. Neste processo, é essencial que as ferramentas sejam interoperáveis e que promovam a geração e modificação expedita de modelos, permitindo assim, a análise, simulação e otimização de várias alternativas (ou prototipagem digital).

A emergência e o rápido desenvolvimento de ferramentas computacionais nestes domínios têm promovido novas abordagens de projeto, nomeadamente o POD, que inspiraram já alguns dos edifícios mais icónicos a nível mundial. No entanto, a exploração destes conceitos tem ainda um enorme potencial de desenvolvimento, que se pretende abordar neste trabalho. Cada vez mais vão surgindo novas ferramentas, mais eficientes e mais ajustadas às necessidades da AEC, inclusivamente algumas já incorporadas na filosofia BIM. (Oxman, R. e Oxman, R., 2010).

Na figura 1.1 apresenta-se um diagrama da metodologia POD, desde a idealização do problema até à sua transferência para ambiente BIM. Este inicia-se pelo estabelecimento dos objetivos, definindo para isso os parâmetros pertinentes. De seguida cria-se o protótipo digital, estruturando-o numa lógica que permita a sua manipulação estratégica em função dos objetivos definidos. Após a criação modelo parametrizado, este entra num processo gerativo, ou seja, num ciclo de ensaios automatizados que permitem a sucessiva geração e avaliação de soluções. A criação de novas soluções é alimentada pelo processo de otimização que, em função dos resultados das simulações de desempenho, vai direcionando o modelo para soluções de desempenho melhorado. Após este ciclo de experimentação e de *feedbacks* automatizados, as soluções satisfatórias/otimizantes são selecionadas para, em conjunto com todos os *stakeholders* envolvidos, ponderar e optar pela solução que, globalmente, melhor se encaixe nos propósitos do projeto. Finalmente, após a fase de ensaio e validação de várias variantes de projeto, a solução eleita pode então ser incorporada em ambiente BIM. Aqui haverá então lugar a preparação do modelo para análises mais rigorosas e preparação de todos os elementos necessários à sua correta execução e fabricação.

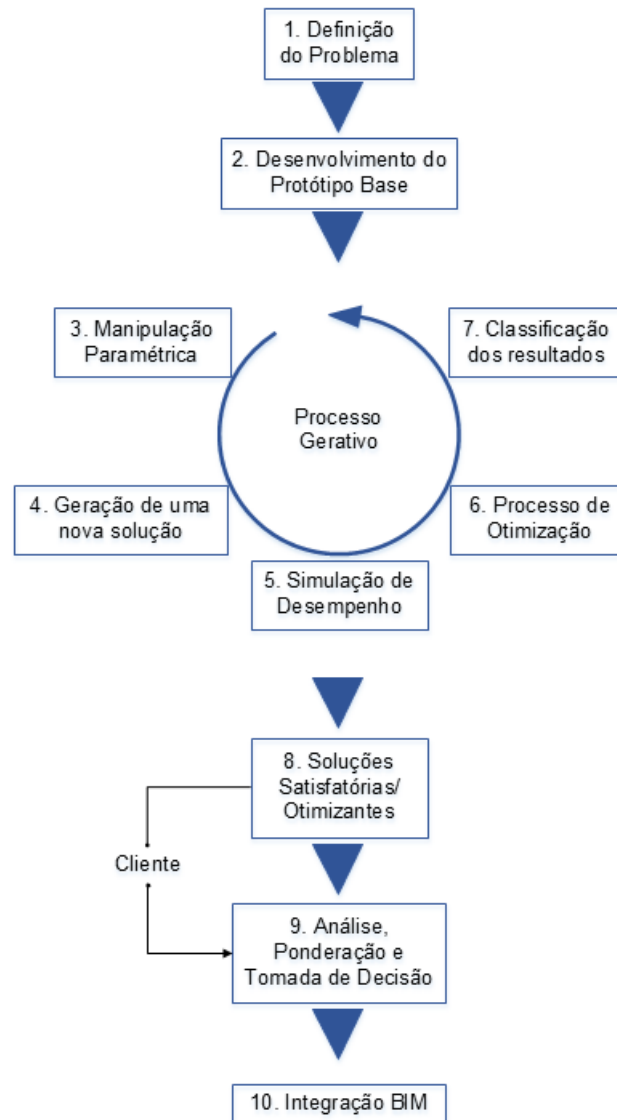


Figura 1.1 – Diagrama de enquadramento da metodologia proposta neste trabalho.

Este trabalho pretende, assim, explorar os conceitos acima resumidos e ferramentas digitais que lhes estão associadas, aprofundando-os primeiro numa perspetiva teórica, sendo depois complementados com casos práticos exemplificativos. É também aprofundado o POD, que permite reunir estes conceitos numa metodologia integrada e adaptada às práticas da AEC. Finalmente, é apresentado um caso de estudo, que pretende aproximar-se de uma situação real de projeto, no domínio do projeto estrutural, como forma de estudo da aplicabilidade da metodologia proposta.

Espera-se, num futuro recente, que estas práticas possam cativar cada vez mais profissionais, deixando de ser exploradas apenas no domínio da investigação e de empresas apostadas na inovação do setor. Mais ainda, a evolução das possibilidades de integração em ambiente BIM, permite tirar partido das vantagens inerentes a ambas as metodologias, conjugando-as numa abordagem de projeto integrada e orientada para o desempenho dos edifícios (Mirtschin, J., 2011).

Os imperativos de sustentabilidade e desempenho estão a conduzir a mudanças fundamentais nas relações entre os vários *stakeholders*. Colocar estes imperativos em prática, implica a consideração e inter-relação de aspetos multidisciplinares logo desde as fases embrionárias de projeto. Existe, portanto,

uma necessidade na exploração de processos integrados para a modelação, análise e otimização de projetos, que permitam lidar com os novos desafios do setor para o século XXI (Sobek, W., 2010).

1.2. OBJETIVOS DO TRABALHO

Face ao enquadramento descrito anteriormente apresentam-se os principais objetivos deste trabalho:

- Enquadrar as ferramentas de modelação paramétrica como potenciadoras de processos gerativos de projeto.
- Mostrar a importância da modelação paramétrica como ferramenta para a integração de avaliações multidisciplinares e colaborativas nos projetos da AEC, principalmente nas fases de conceitualização.
- Estudo de técnicas de otimização, elucidando os princípios algorítmicos por detrás destas técnicas meta-heurísticas, focando principalmente os algoritmos evolucionários.
- Exploração de um processo que permita integrar a modelação paramétrica, análise e otimização de desempenho em projetos, o POD, reunindo assim, os conceitos explorados numa abordagem potenciadora de melhores práticas no setor.
- Examinar, em que medida o POD pode ser incorporado em ambientes BIM, potenciando projetos mais estruturados, centralizados e de desempenho melhorado.
- Proposta de um *framework* concetual de aplicação do POD, aplicando-o a casos práticos.
- Aplicação dos conceitos explorados a um caso de estudo que permita repercutir a sua aplicabilidade nos projetos da AEC, com especial enfoque no projeto estrutural.
- Exploração de ferramentas digitais de suporte ao POD, tendo como base a plataforma Rhinoceros.

1.3. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Para além do enquadramento feito e da definição dos objetivos constantes deste primeiro capítulo, este trabalho organiza-se em mais quatro capítulos:

- No capítulo 2, *Modelação Paramétrica*, procede-se ao enquadramento deste tipo de modelação no contexto dos processos gerativos, trabalho colaborativo no setor, e a sua integração em ambiente BIM. Faz-se ainda um resumo das principais ferramentas de modelação paramétrica existentes.
- No capítulo 3, *Técnicas Evolucionárias de Otimização de Problemas*, enquadram-se estas técnicas no contexto da resolução de problema na AEC. Faz-se também uma abordagem aos princípios subjacentes à representação algorítmica de problemas, no contexto da ferramenta de otimização evolucionária Galapagos.
- No capítulo 4, *Projeto Orientado pelo Desempenho*, propõe-se uma metodologia de projeto que se baseia na modelação paramétrica como suporte à criação de protótipos digitais de edifícios. Desta forma exploram-se ferramentas digitais para a geração e modificação expedita de modelos digitais, nos quais é possível incorporar simulações, análises e otimizações de desempenho. Propõe-se ainda um *framework* concetual de aplicação do POD, e são apresentadas algumas obras a título ilustrativo. Faz-se também um estudo do *framework*, através de dois casos práticos exemplificativos dos conceitos e ferramentas de aplicação do POD.
- No capítulo 5, *Caso de Estudo*, utiliza-se um projeto, desenvolvido em colaboração com a empresa bimTEC, para avaliar as potencialidades da aplicação prática de processos integrados para a análise, modelação e otimização de projetos. Exploram-se as potencialidades dos *softwares*

Rhinoceros, Grasshopper e seus *plug-ins*, com especial foco no projeto estrutural, procurando avaliar a aplicabilidade do POD nas práticas da AEC.

2

MODELAÇÃO PARAMÉTRICA

2.1. ENQUADRAMENTO GERAL E PERSPETIVA HISTÓRICA

Na década de 50, em paralelo com o desenvolvimento de métodos computacionais de fabricação, a indústria automóvel começou a estabelecer princípios computacionais capazes de representar superfícies curvas e não-ortogonais, características dos componentes dos *chassis* automóveis. Pierre Bézier e Paul Casteljaou, dos laboratórios da Renault e Citroën, desenvolveram os fundamentos matemáticos para a representação polinomial de curvas, as *splines*. O problema foi depois estendido à representação de superfícies curvas e não-ortogonais, as superfícies NURBS (*Non-Uniform Rational Basis Spline Surfaces*) (Dimcic, M., 2011).

A representação matemática das NURBS assenta na definição paramétrica de curvas e superfícies. O que tornou as NURBS particularmente apelativas para a IC, foi a sua capacidade de facilmente controlar a forma das curvas ou superfícies, através da manipulação dos seus pontos de controlo e nós. As NURBS tornaram as topologias arquitetónicas mais heterogéneas computacionalmente possíveis. Para além disto, a sua construção passou a ser alcançável através das máquinas CNC (Controlo Numérico Computorizado) (Kolarevic, B., 2001).

Desde os anos 80, aquando da sua introdução nas ferramentas CAD e CAM direcionadas para a IC, o conceito prosperou rapidamente até que, hoje em dia, se encontra generalizado nos *softwares* de modelação para a representação geométrica das *free-forms* (Dimcic, M., 2011). A modelação paramétrica surgiu inicialmente de *scripts* computacionais, que permitiam gerar variações ao desenho através da atribuição de diferentes valores a parâmetros geométricos, baseados na construção de NURBS.

Atualmente, as ferramentas de modelação paramétrica disponíveis, oferecem já sofisticados interfaces tridimensionais, bastante interativos e intuitivos, que permitem fazer variações paramétricas em tempo real. Deste modo, o projetista pode ter um controlo e *feedback* imediato sobre o seu modelo digital. Um modelo paramétrico é, por isso, uma representação computacional de um desenho com entidades geométricas, físicas ou de outra natureza que têm atributos fixos e atributos paramétricos, isto é, que podem variar. Este processo permite, sem grande esforço, substituir a singularidade pela multiplicidade no processo de modelação, possibilitando criar variantes de projeto pela simples modificação dos atributos paramétricos (Scheurer, F., 2010).

A geometria desde sempre constituiu a base do processo de desenho arquitetónico. O advento das *free-forms* na arquitetura contemporânea, permitido pela exploração das ferramentas paramétricas, veio trazer grande complexidade e desafio aos modelos arquitetónicos (Pottmann, H., 2010). Frank Gehry foi dos primeiros a aplicar as *free forms* nos seus edifícios. Obras icónicas como o Museu Guggenheim em Bilbao (1997) (Shelden, D.R., 2002), ilustrado na figura 2.2, ou o Walt Disney *Concert Hall* em Los Angeles (2004) (Shelden, D.R., 2002) são exemplo do espólio deste arquiteto. Outros arquitetos como

Massimiliano Fuksas (Scheible, F., 2011) (figura 2.3), Zaha Hadid ou Toyo Ito são também exemplo da exploração das *free forms* como expressão arquitetónica contemporânea.

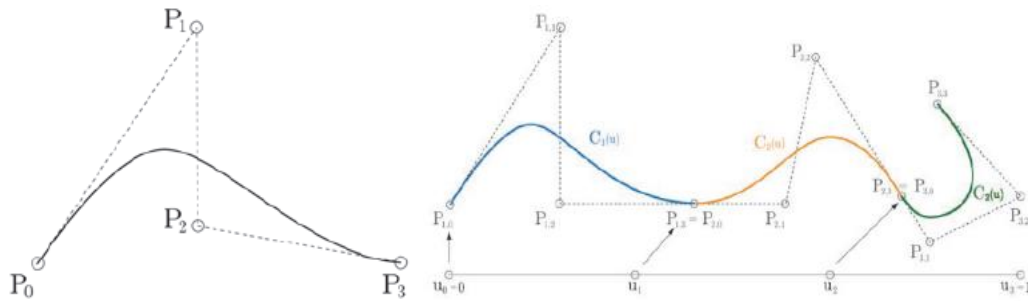


Figura 2.1 - À esquerda uma curva de Bézier de 3º grau, cuja aglutinação por partes origina uma *spline* como ilustrado à direita (Dimcic, M., 2011).



Figura 2.2 - Museu Guggenheim, Bilbao, Espanha, 1997, F. Gehry (Shelden, D.R., 2002).

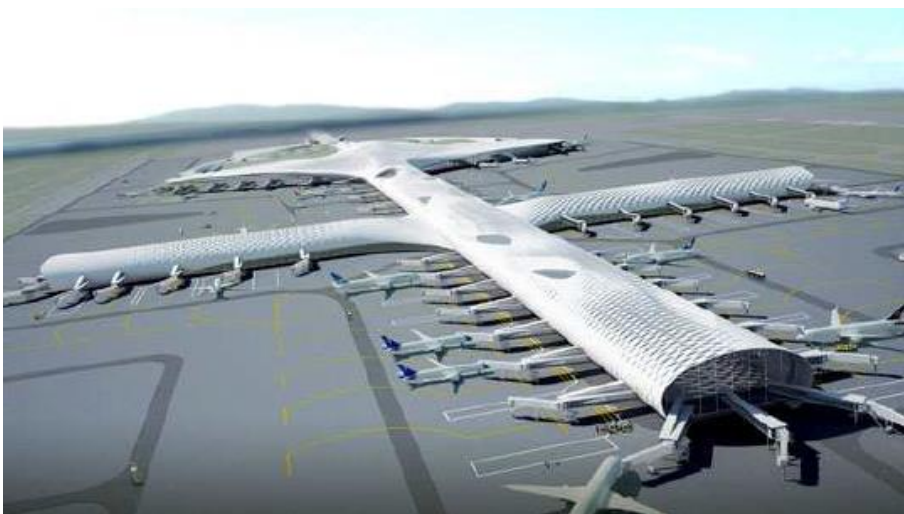


Figura 2.3 - Aeroporto Internacional Bao'an, Shenzhen, China, 2011, M. Fuksas; (Renderização de Fuksas Studio) (Scheible, F., 2011).

Na área da engenharia, a exploração de geometrias irregulares e curvilíneas também suscitou sempre grande interesse, tendo, no entanto, assumido grande relevância desde meados do século XX.

Quando um cabo é suspenso entre dois apoios, sujeito apenas à ação da gravidade, fica sujeito unicamente a forças de tensão e forma uma curva matemática conhecida por catenária. Quando, sob a mesma ação, a catenária é invertida passa a estar sujeita apenas a forças de compressão. Este princípio foi desenvolvido por Robert Hooke, no século XVII, para a Catedral de São Paulo, em Londres. Posteriormente vários engenheiros e arquitetos, como Antoni Gaudí, exploraram também este princípio. No entanto, só nos anos 50, este princípio foi aplicado com sucesso em membranas tridimensionais finas com o trabalho do engenheiro Suíço Heinz Isler. O seu método baseava-se na criação de uma grelha de pontos sob um molde de gesso feito à escala (figura 2.4), sob os quais, ele realizava medições e testes de carga, para depois serem corretamente transpostos nas suas construções. No seu artigo “*New Shapes for Shells*” de 1959 descreveu vários outros métodos inovadores para obter “estruturas complexas e superfícies *free-form*” (Chilton, J., 2010). Outras abordagens relevantes, no âmbito da engenharia estrutural, às *free-forms* são as de Buckminster Fuller, com as cúpulas geodésicas, que incorporavam já princípios de pré-fabricação de elementos estruturais e as de Frei Otto com as suas estruturas em membrana leve (figura 2.5) (Dimcic, M., 2011).



Figura 2.4 - Esquerda: Maquete de gesso feita por H. Isler; Direita: Wyss Garden Centre, Solothurn, Suíça, 1962, H. Isler (Chilton, J., 2010).

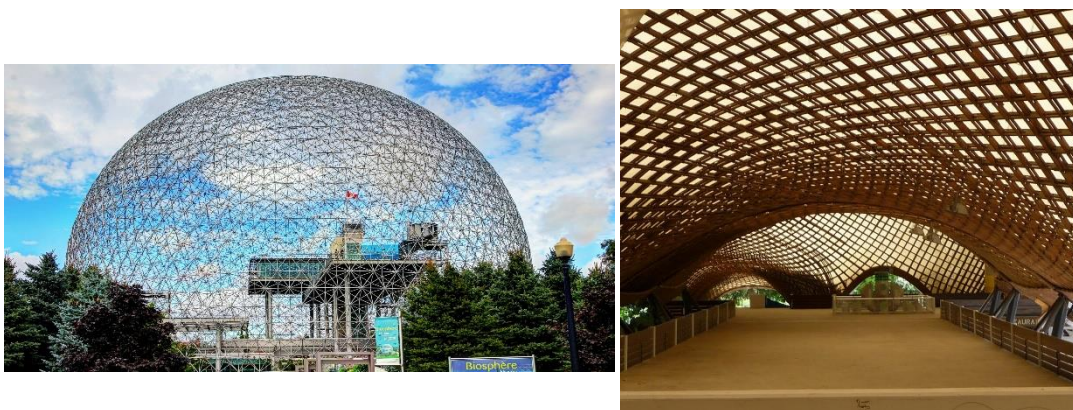


Figura 2.5 - Esquerda: *The Biosphere* (76m de diâmetro), Montreal, Canada, 1967, B. Fuller (sawallpapers.com, 2012); Direita: *Multihalle*, Mannheim, Alemanha, 1975, F. Otto (Panoramio, 2009).

O projeto de estruturas complexas tridimensionais está entre os desafios mais interessantes para os engenheiros estruturais. Sejam elas visíveis ou não, estas formam sempre o esqueleto de suporte do projeto arquitetónico e a base da coordenação geométrica. Neste contexto, para lidar com a complexidade geométrica inerente às *free-forms*, é necessário estabelecer novas estratégias que permitam, simultaneamente, interpretar o comportamento estrutural, integrar princípios arquitetónicos, de produção e de outras especialidades, na modelação (Mangelsdorf, W., 2010).

Atualmente, o domínio da modelação de paramétrica extravasa já a construção computacional de geometrias complexas. A modelação paramétrica pretende ser uma ferramenta de auxílio à geração de múltiplas opções de projeto, assim como ao trabalho colaborativo entre as várias disciplinas envolvidas. Principalmente nas etapas embrionárias, a exploração e avaliação multidisciplinar de alternativas é essencial para produzir soluções de desempenho melhorado. A construção de uma maquete digital parametrizada tem potenciado o diálogo colaborativo entre os vários *stakeholders*. Estes modelos paramétricos têm vindo a fomentar metodologias de projeto mais eficientes. Desta forma, logo nas etapas concetuais, é possível explorar e testar várias soluções, aglutinando o conhecimento dos diversos domínios envolvidos e os requisitos do cliente. Assim, o processo de projeto é, desde logo, guiado, além das intenções estéticas e funcionais, também por aspetos de desempenho, coordenação e produção (Shelden, D., 2013).

2.2. MODELAÇÃO PARAMÉTRICA COMO PROCESSO GERATIVO

Os sistemas CAD convencionais focam a sua atenção apenas na representação geométrica. No entanto, atualmente, o foco da indústria concentra-se em sistemas cujo modelo é representado parametricamente (Aish, R. e Woodbury, R., 2005). Num modelo paramétrico são os parâmetros do projeto que são definidos, ao invés da geometria ou formas definitivas. Ao atribuir diferentes valores aos parâmetros, é possível obter novas formas e configurações para o modelo base, definindo assim uma geometria associativa. Ou seja, as diferentes entidades geométricas que constituem o modelo, encontram-se mutuamente e intrinsecamente relacionadas (Kolarevic, B., 2001).

As ferramentas CAD não paramétricas (mais convencionais) têm por objetivo principal a representação geométrica de formas que assentam num projeto de estado único, isto é, estático. Contrariamente, a modelação paramétrica, permite a divergência no estado do projeto, de modo a explorar variantes de um mesmo modelo, ao parametrizá-lo. Deste modo, a modelação paramétrica assenta em princípios dinâmicos e interativos, permitindo ao projetista explorar uma grande variedade de opções, rever alternativas e ajustar ou melhorar a maquete digital, ao longo de todo o processo (Dino, Í.G., 2012).

Um modelo paramétrico depende das relações estabelecidas entre as diversas entidades que compõem o modelo. Estas relações são estabelecidas por regras e restrições (ou genericamente parâmetros), que definem aspetos do projeto, assim como as suas relações e interdependências. Alterar uma regra ou restrição, ou mesmo alterar uma parte do próprio modelo, tem, portanto, implicações em todo o modelo (Dino, Í.G., 2012).

Os modelos digitais são explícitos porque todos os aspetos do projeto são bem definidos e podem ser descritos computacionalmente. Nos modelos não paramétricos a geometria é explícita mas as regras de modelação são implícitas - o modelo não mantém o controlo dos parâmetros. Em contraste, os modelos paramétricos têm regras explícitas e geometria implícita - as relações e regras entre as partes do projeto é que definem a geometria resultante (Kolarevic, B., 2003b).

A modelação paramétrica é uma subcategoria da modelação algorítmica, devido à sua construção baseada em algoritmos. Computacionalmente falando, não existe diferença entre os dois conceitos, uma

vez que os algoritmos por definição operam sobre parâmetros, sendo por isso, a base fundamental dos modelos paramétricos. No entanto a modelação paramétrica, ao contrário da algorítmica, dá ênfase à manipulação direta e explícita dos parâmetros, conferindo ao processo um manuseamento bastante mais intuitivo, dinâmico e estratégico (Dino, Í.G., 2012).

Recentemente, surgiu um novo conceito no seio da AEC, o *Generative Design*, aqui referido como Processo Gerativo de projeto. Um modelo paramétrico é um método computacional que tem a capacidade de atuar como um processo gerativo e analítico ao longo da fase de projeto. Os processos gerativos e analíticos têm vindo a ganhar grande aceitação por parte de engenheiros, arquitetos e investigadores, como forma de criar protótipos digitais dos seus edifícios (Dino, Í.G., 2012). Neste subcapítulo pretende-se explorar o papel da modelação paramétrica no processo gerativo, sendo a vertente analítica - que envolve a análise de desempenho dos edifícios - desenvolvida em profundidade no capítulo 4.

A modelação baseada em conceitos paramétricos permite a geração de inúmeras soluções, pela simples manipulação de parâmetros. Este processo diz-se gerativo porque torna a ferramenta computacional num gerador de soluções baseado nas relações paramétricas definidas pelo utilizador, deixando de ser um mero assistente de modelação (Shea, K. [et al.], 2005). Os sistemas gerativos possibilitam, rapidamente, a formação de sucessivas composições geométricas, que pelas metodologias tradicionais envolveriam grande esforço de modelação. Assim, os processos gerativos, embora requeiram maior esforço inicial de modelação, após a formação do modelo permitem manipula-lo de forma rápida e intuitiva. Desta forma, a equipa de projeto consegue canalizar esforços para a sua atividade nuclear, desperdiçando menos tempo em alterações ao modelo (muitas vezes repetitivas), cada vez que estas se revelem necessárias.

O processo gerativo pode envolver tanto modelações formais como conceptuais, e envolve a implementação de um conjunto de operações e parâmetros que permitem manipular a maquete digital de acordo com os objetivos do projetista. O controlo que o modelo permite para gerar novas soluções pode, no limite, sugerir novas ideias e libertar a criatividade do seu autor.

Porém, a emergência deste processo inovador pode resultar num entendimento erróneo e superficial do seu verdadeiro potencial e da sua aplicação paramétrica. O processo gerativo sugere a transferência de algumas tarefas e inteligência de modelação do projetista para as ferramentas de modelação, conferindo-lhes um certo grau de autonomia (Dino, Í.G., 2012). No entanto, é necessário frisar que isto não significa que a ferramenta de modelação passe a fazer o papel do projetista, mas sim que o projetista consegue externalizar, esquematizar e especificar em forma de código paramétrico a sua inteligência e conhecimentos técnicos. Desta forma, uma ferramenta computacional que incorpore processos gerativos consegue levar a cabo tarefas de modelação e de resolução de problemas, que sem esta requereriam muito mais esforço de modelação e de repetição de tarefas (Dino, Í.G., 2012).

Kolarevic complementa ainda esta ideia afirmando que:

“O papel gerativo das novas tecnologias digitais é conseguido através da simultânea interpretação e manipulação da construção computacional por parte do projetista. (...) A capacidade das ferramentas computacionais para gerar “novos” projetos é, portanto, altamente dependente das capacidades perceptivas e cognitivas do projetista à medida que os processos dinâmicos emergem.” (Kolarevic, B., 2003b).

Assim, o processo gerativo é dependente da capacidade do projetista, mas tem a habilidade de provocar novas ideias e resolver problemas complexos, cuja assistência ao projeto pode complementar as capacidades do projetista, sugerir novas ideias e libertar a sua criatividade (Shea, K. [et al.], 2005).

Este novo entendimento traz um modo inovador de pensar o processo de projeto. Nos processos gerativos, o desafio recai em cultivar a computação como uma ferramenta que complementa as capacidades do projetista, no que respeita à concetualização e produção de projetos (Ahlquist, S. e Menges, A., 2011). A exploração de processos gerativos pode ter grande pertinência ao longo de todo o processo de projeto. Ainda assim, tem revelado especial importância na fase de concetualização, ao permitir alargar os horizontes desta. (Turrin, M. [et al.], 2011).

A fase concetual, tradicionalmente, encontra-se estritamente relacionada com a arquitetura. Nesta fase os arquitetos tendem a identificar uma direção a seguir com base em critérios de projeto limitados e sem clarificar completamente o conceito (Darke, J., 1979).

Wang afirma que a concetualização procede através de um processo de aprendizagem incremental, no qual é impossível desenvolver uma solução apropriada numa tentativa apenas. Em vez disso, existem fases de divergência que permitem produzir alternativas de projeto e fases de convergência, onde as soluções mais promissoras são selecionadas (Wang, J., 2002).

Existem dois grandes benefícios na exploração de alternativas de projeto: a revelação e a comparação (Woodbury, R.F. e Burrow, A.L., 2006). Por um lado, as alternativas revelam aspetos que o projetista pode não ter considerado, e sugerem futuros campos de exploração. Por outro lado, a comparação desempenha um papel fundamental na compreensão acerca de cada alternativa e sobre qual ou quais satisfazem certos critérios e objetivos de projeto, e qual ou quais, globalmente, são mais satisfatórias (Turrin, M. [et al.], 2011). É neste contexto que a modelação paramétrica, utilizada como processo gerativo, se pode revelar mais vantajosa, ao permitir a exploração de variantes de projeto e possibilitar a geração destas segundo critérios não só arquitetónicos, mas também do domínio da engenharia e de produção.

Ao permitir uma decisão mais informada e consciente por parte do projetista, as opções tomadas com base no processo gerativo, têm o potencial para impactar positivamente em todo o processo de projeto. Daqui, pode-se concluir que a utilização de processos gerativos tem também capacidade para propagar os seus benefícios a todo o ciclo de vida dos edifícios, ao possibilitar o incremento da sua qualidade global.

O interesse pelos processos gerativos tem vindo a crescer cada vez mais desde a viragem do milénio. Vários são os exemplos de aplicação destes processos no setor da AEC, com foco em diversos aspetos de projeto, quer sejam eles no domínio da arquitetura, engenharia ou numa simbiose de ambos.

Em 2001, Duarte propôs um processo gerativo baseado no conjunto habitacional da Quinta da Malagueira em Évora, de Álvaro Siza Vieira (AlvaroSizaVieira.com, 2009). O propósito foi gerar soluções baseadas em parâmetros relacionados com requisitos desejados pelo cliente. O sistema simultaneamente deveria ir ao encontro de requisitos habitacionais e funcionais do cliente, assim como, não infringir os regulamentos habitacionais Portugueses. O objetivo do autor foi criar um processo que permita a customização em massa ao nível habitacional, criando um produto adaptado a cada cliente, num empreendimento, cuja ideia inicial do arquiteto foi mesmo quebrar a repetição restrita e típica dos conjuntos habitacionais de baixo custo (Duarte, J.P., 2001).

No domínio da Engenharia, também os processos gerativos têm suscitado grande interesse. Por exemplo, na área estrutural, a geração de soluções com base em cálculos FEM (*Finite Element Method*) tem vindo a ser usada para estudar o comportamento de estruturas sob ações externas. Um exemplo disto é o trabalho desenvolvido pela Bollinger + Grohmann Engineers (Preisinger, C., 2013) na ponte pedonal Skylink, com 300 m, no aeroporto de Frankfurt, ilustrado na figura 2.6. É uma ponte que forma uma estrutura em caixão treliçado e cujas diagonais, definidas parametricamente, vão sendo sucessivamente

reposicionadas de modo a chegar ao melhor *trade-off* entre os deslocamentos e o peso da estrutura, possibilitando otimizar o seu desempenho estrutural. A geração sucessiva de soluções foi conseguida através da utilização de ferramentas de modelação paramétrica e análise FEM, em conjugação com algoritmos de otimização - assunto a desenvolver no capítulo 3.



Figura 2.6 - Esquerda: Ponte Skylink, Frankfurt, Alemanha, 2011, Bollinger + Grohmann; Direita: Análise FEM da Ponte (Preisinger, C., 2013).

2.3. MODELAÇÃO PARAMÉTRICA COMO PROCESSO COLABORATIVO

A arquitetura e a engenharia têm sido tradicionalmente caracterizadas pelo desenvolvimento de um raciocínio sequencial de “forma, estrutura e material” (Oxman, R. e Oxman, R., 2010). A sequência começa, primeiro com a formação do conceito por parte do arquiteto que depois é transmitido aos engenheiros, que desenvolverão estruturalmente e materialmente o projeto, em colaboração com os primeiros. Em contradição com este processo de pós-racionalização, na última década, surgiu uma nova abordagem, cujo envolvimento do domínio da engenharia, logo desde a fase conceitual, começou a mostrar-se muito benéfico para o produto final. As relações colaborativas que se desenvolveram entre arquitetos e engenheiros (principalmente estruturais) contribuíram para a produção de alguns dos edifícios mais icónicos a nível mundial. Exemplo disso são Cecil Balmond e ARUP com Toyo Ito no pavilhão das *Serpentine Galleries* em Londres, Reino Unido (2002) (Oxman, R. e Oxman, R., 2010), Buro Happold com Zaha Hadid Architects no Museu dos Transportes de Glasgow, Escócia (2011) (Mangelsdorf, W., 2010), ou Water Cube entre a ARUP, China Construction Design International e PTW Architects para os jogos Olímpicos de Beijing, China (2008) (Holzer, D. e Downing, S., 2010).

No caso do Museu dos Transportes de Glasgow (figura 2.7), a título de exemplo, para acomodar as *free forms* do conceito arquitetónico, e de modo a eliminar pilares intermédios na principal sala de exposições, a estrutura da cobertura teria de vencer vãos de 30 m. Para compatibilizar a geometria irregular com a estrutura da cobertura, os engenheiros transformaram os planos inclinados em treliças rigidamente conectadas entre si pelas linhas formadas nos “vales” da geometria. Na transição entre as várias placas treliçadas, os engenheiros estruturais usaram, de forma inteligente, a geometria composta por uma série de cascas convexas e concavas interligadas entre si, criando vigas rígidas que abrangem todo o vão e que apenas apoiadas nos extremos da fachada, conseguiam vencer o vão sem pilares intermédios. Esta obra é um exemplo onde as *free forms* foram elegantemente utilizadas como estrutura, percebendo as oportunidades que o conceito da arquiteta oferecia (Mangelsdorf, W., 2010).



Figura 2.7 - Museu dos Transportes, Glasgow, Reino Unido, 2011, Zaha Hadid Architects e Buro Happold; Pormenor da estrutura treliçada que criou oportunidades colaborativas entre arquitetos e engenheiros estruturais (Bernard, M., 2012).

As ferramentas computacionais de análise e simulação de edifícios, que se baseiam na modelação por parâmetros, estão a revolucionar o métodos de trabalho dentro da AEC. Enquanto que na era pré-digital, o trabalho do engenheiro levaria vários dias ou mesmo semanas para analisar e calcular um projeto, hoje em dia, as ferramentas permitem que este processo se encurte consideravelmente. Deste modo, as ferramentas disponíveis atualmente vieram permitir uma colaboração concomitante entre o trabalho dos arquitetos e engenheiros, permitindo aproximar o ciclo de experimentação e conceptualização do arquiteto com o *feedback* técnico providenciado pelos engenheiros.

A nova era digital veio aumentar a velocidade de troca de informação, criando a oportunidade para uma colaboração entre todos os intervenientes desde a fase embrionária do projeto. A modelação paramétrica veio permitir a geração de alternativas de projeto, tornando-o flexível e ao mesmo tempo controlado. Ao descrever a geometria através de parâmetros, é possível que aspetos estéticos, de desempenho, regulamentares, entre outros, sejam interligados e compatibilizados pelas várias especialidades de forma integrada, promovendo a exploração de várias vertentes de projeto e a análise multidisciplinar, num relativo curto espaço de tempo (Holzer, D. e Downing, S., 2010).

O maior benefício da estreita colaboração entre arquitetos e engenheiros, desde a fase concetual do projeto, está na possibilidade de rapidamente produzir e analisar múltiplas opções. A equipa pode então, depois, comparar e tomar decisões mais informadas, baseando-se em parâmetros de desempenho objetivos e mensuráveis oriundos dos vários domínios do conhecimento envolvidos no processo. Holzer e Downing apelidam esta nova abordagem de *Optioneering*, a qual se encontra ilustrada esquematicamente na figura 2.8, numa comparação com a abordagem tradicional de projeto (Holzer, D. e Downing, S., 2010).

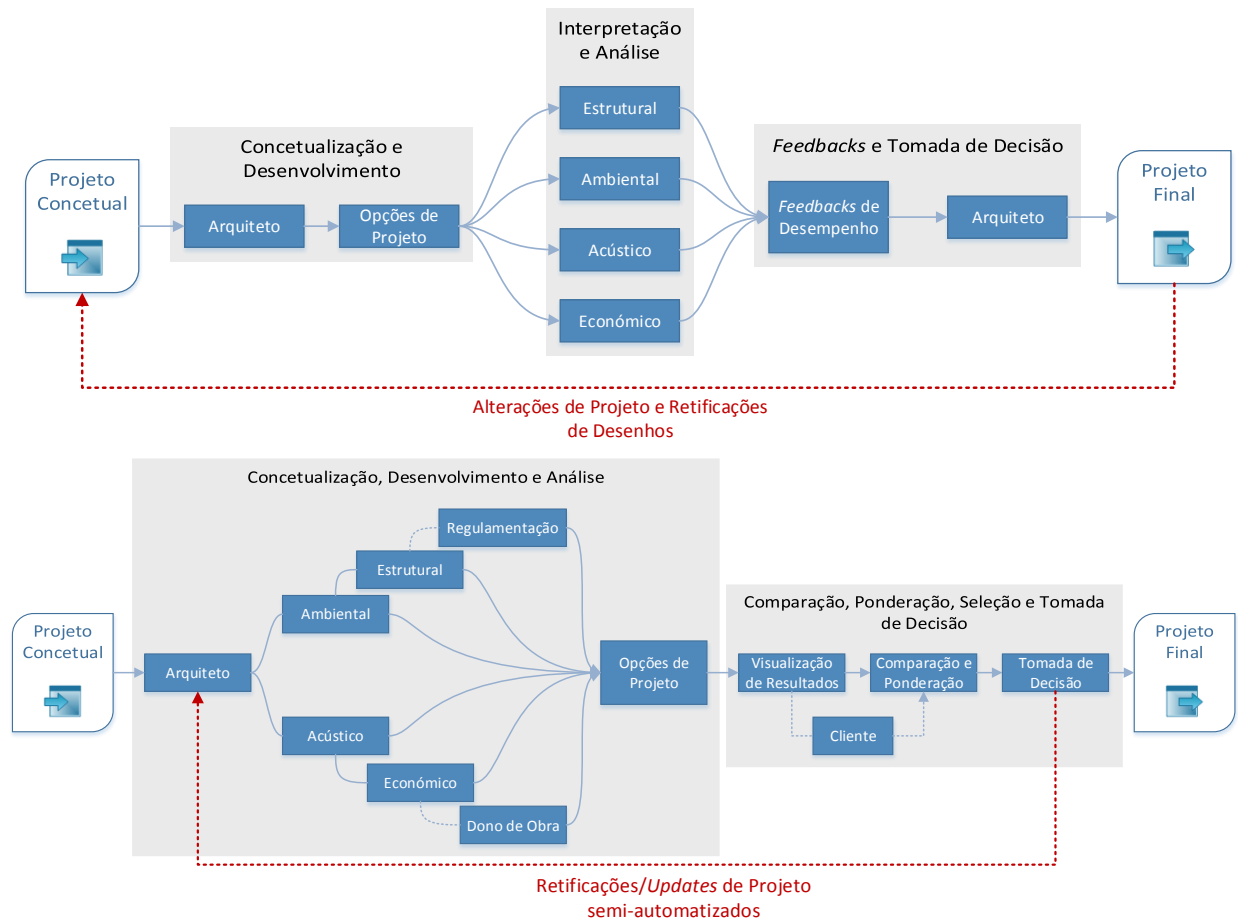


Figura 2.8 - Comparação entre a abordagem tradicional de projeto (acima) e a nova abordagem colaborativa *Optioneering* (abaixo); Adaptação de (Holzer, D. e Downing, S., 2010).

2.4. INTEGRAÇÃO DA MODELAÇÃO PARAMÉTRICA NO CONTEXTO BIM

Na AEC, os projetos têm vindo a tornar-se cada vez mais complexos de gerir. As interdependências entre os diferentes intervenientes no processo construtivo, o fluxo de informação baseado nas plataformas *web*, a economia emergente baseada na colaboração organizacional, a especialização das empresas num *core-business* cada vez mais específico ou a necessidade de conseguir resultados num curto espaço de tempo, trazem cada vez mais importância à gestão da informação (Bryde, D. [et al.], 2013). Para dar resposta a este problema, o setor começou a perceber a importância de adotar plataformas de colaboração e negócio eletrónico, recorrendo às TIC (Tecnologias da Informação e Comunicação) (Grilo, A. e Jardim-Goncalves, R., 2010). No entanto, e apesar das TIC não serem novidade no setor, a maior revolução que a AEC experimentou desde a viragem do século foi a proliferação dos *Building Information Modeling* (BIM) no meio académico e organizacional (Bryde, D. [et al.], 2013). O conceito BIM afirma-se como um conjunto integrado de políticas, processos e tecnologias que geram uma metodologia para gerir toda informação de um edifício, de forma centralizada e em formato digital, que integra todo o seu ciclo de vida, desde a sua conceção até à sua demolição ou desativação (Succar, B., 2009).

A abordagem técnica das plataformas BIM é, por inerência, paramétrica (Eastman, C. [et al.], 2011). Mais especificamente, a criação de uma maquete digital em ambiente BIM é feita através da modelação e ajuste de objetos paramétricos. Estes objetos têm um comportamento que é configurável através de uma série de propriedades explícitas - isto é, parametrizáveis - inerentes a esse dado objeto. Assim toda

a modelação BIM é gerada e modificada com base num conjunto de instruções de código associadas cada objeto específico (*scripted objects*) e que, no seu conjunto, formam um modelo digital do edifício.

Apesar das plataformas BIM assentarem em funcionalidades paramétricas, derivadas da sua programação interna, estas contrastam com as ferramentas de modelação paramétrica com base em sistemas 3D CAD. A grande diferença assenta no significado semântico atribuído aos objetos criados (Boeykens, S., 2012). Por exemplo, enquanto num *software* BIM, uma parede recebe imediatamente informação acerca de toda a sua composição (camadas, materiais, propriedades físicas, fabricante, fornecedor, *etc*), nos sistemas 3D CAD esta permanecerá apenas como um volume genérico, sendo o seu significado semântico deixado ao entendimento do projetista.

O ênfase numa estrutura semântica pré-definida, característica dos sistemas BIM, leva a que todos os objetos modelados tenham um significado e função pré-estabelecidos, limitando o grau de liberdade do modelador. Em contraste, a modelação paramétrica, com base em sistemas 3D CAD, foca-se essencialmente na geometria, tornando-a mais fácil de manipular. Um bom exemplo disto é a incorporação de processos gerativos de projeto. Os processos gerativos têm incorporado ferramentas de programação visual nos ambientes paramétricos (muitas vezes aliadas a ferramentas de análise e otimização de desempenho de edifícios e *CAM/Digital Fabrication*), de modo a gerar e analisar rapidamente modelos concetuais (ver capítulo 4). Esta abordagem, embora mais genérica e incompleta, e ao contrário do que acontece nos sistemas BIM, não retira flexibilidade aos modelos e não requiere a inserção de toda a informação logo à partida, deixando o significado semântico em aberto. Assim a modelação paramétrica com base em sistemas 3D CAD mostra-se mais flexível e expedita, embora menos detalhada que os sistemas BIM (Boeykens, S., 2012).

Por um lado, a abordagem BIM permite obter modelos estruturados, centralizados e integrados ao nível da informação. Por outro, as ferramentas 3D CAD paramétricas, tendem a recair em plataformas abertas, muitas destas com base em programação visual. Ao serem plataformas abertas – cujos *scripts* são abertos a qualquer um que pretenda melhorá-los ou modificá-los - têm criado uma comunidade de utilizadores das mais diversas áreas, criando novas oportunidades dentro do setor AEC. (Boeykens, S., 2012).

“Os ambientes computacionais de projeto estão a experimentar uma fase de grandes transformações. Os avanços nos interfaces de programação, cada vez mais amigáveis e fáceis de utilizar têm permitido a emergência de ecossistemas digitais” (Davis, D. e Peters, B., 2013).

Um dos mais proeminentes exemplos disto foi a Robert McNeel & Associates, com a introdução da aplicação de programação visual Grasshopper na sua ferramenta de modelação NURBS/CAD Rhinoceros. Esta aplicação permite a inclusão de *plug-ins* desenvolvidos por terceiros, bem como a utilização da sua API (*Application Programming Interface*), de modo a facilitar o desenvolvimento de processos gerativos, colaborativos e analíticos dentro da ferramenta. Através da combinação de dados geométricos, provenientes do Rhinoceros, de *inputs* paramétricos/algorítmicos do Grasshopper, e de *outputs* de dados para os mais diversos formatos (como texto, folhas de cálculo ou IFC), esta abordagem permite que uma grande variedade de ferramentas computacionais sejam conectadas entre si, criando um ecossistema digital em constante evolução e adaptação às novas necessidades da AEC (Davis, D. e Peters, B., 2013).

Usando o Grasshopper como exemplo de plataforma aberta, é possível constatar que são vários os domínios nos quais se inserem os *plug-ins* desenvolvidos por terceiros que lhe permitem alargar as suas potencialidades nativas. Estes domínios envolvem a interoperabilidade com ferramentas externas como BIM (por exemplo, GeometryGym), ferramentas de análise de desempenho (por exemplo, GECO), métodos de fabricação (por exemplo, KingKong). Existem também *plug-ins* que adereçam técnicas de otimização algorítmica (por exemplo, Galapagos), análise de desempenho estrutural (por exemplo,

Karamba), para além daquelas que estendem as capacidades nativas da ferramenta (por exemplo, WeaverBird). A aplicação destas ferramentas será analisada com mais detalhe nos capítulos 4 e 5.

A grande vantagem de ferramentas como o Grasshopper, reside na sua facilidade para incorporar *plugins*, que facilmente funcionam em conjunto e trocam dados, criando um ambiente coordenado, interoperável e libertador para o projetista, como discutido por (Davis, D. e Peters, B., 2013).

Apesar da crescente recetividade do setor à metodologia BIM, existem ainda muitos profissionais e investigadores relutantes em adotar estas plataformas de forma transversal no ciclo de projeto. Especialmente nas fases iniciais, alguns profissionais preferem utilizar ferramentas mais genéricas, como as acima referidas. Estas permitem que o projetista tenha controlo total sobre a formação geométrica, melhorando a experiência criativa e retirando complexidade aos modelos, que apenas se revela necessária em fases posteriores (Boeykens, S., 2012). Neste contexto, e ainda que não sejam representativos da postura da classe como um todo, muitos profissionais têm integrado no seu *workflow* a modelação paramétrica com recurso a ferramentas de programação visual (também nomeadas como programação *dataflow*), tirando partido da simplicidade e flexibilidade por estas permitidas.

Numa perspetiva mais genérica, ambas as abordagens têm vantagens e limitações. Por um lado o ambiente BIM fornece a possibilidade de criar um modelo com significado semântico, atribuindo e agregando informação, para além da geométrica, estruturando assim a informação num modelo central. Por outro lado, o ambiente 3D CAD alargado pelas possibilidades da programação visual, pretende criar modelos simples e fáceis de trabalhar parametricamente, promovendo processos gerativos - como discutido em 2.2 - e facilitando a prototipagem digital antes de partir para a produção final do projeto.

Na convergência das abordagens em discussão, a interoperabilidade é central. Os recentes desenvolvimentos nesta área têm revelado o potencial da utilização complementar de ambas as abordagens. Ao promoverem a identificação e análise de diversas alternativas de projeto, a utilização da modelação paramétrica em conjunto com a metodologia BIM tem-se mostrado vantajosa para identificar melhores soluções, incrementando a qualidade final dos edifícios construídos (Mirtschin, J., 2011).

Os *softwares* BIM cada vez mais se apoiam na estrutura *Industry Foundation Classes* (IFC), que permite a permuta de informação entre diversos sistemas informáticos (Pinho, S., 2013). No entanto, existem também casos em que o modelo é exportado através de outros protocolos ou mesmo diretamente para outras ferramentas, como discutido por (Boeykens, S., 2012). Na modelação paramétrica, com base em programação visual, existem também vários métodos para a transferência dos modelos para ambiente BIM. Para ilustrar os mecanismos de interoperabilidade, foram selecionadas algumas ferramentas que operam entre o Grasshopper e o Autodesk Revit, que se encontram sintetizadas no quadro 2.1.

Quadro 2.1 - Ferramentas de interoperabilidade entre Rhinoceros/Grasshopper e Autodesk Revit.

Ferramentas de Interoperabilidade	Desenvolvimento	Método de troca de dados	Fontes
GeometryGym	Jon Mirtschin	Formato IFC (já com versão Beta para IFC4)	http://geometrygym.wikidot.com
Chameleon	HiJAC-Creative	Formato gbXML	http://www.hijac-creative.com/research/chameleon
HummingBird /Whitefeet	Tim Meador e Mario Guttman	Formato CSV	http://ghhummingbird.wordpress.com
Superb LyreBird	LMNts	Tradução de dados via API	http://lmnts.lmnarchitects.com/bim/superb-lyrebird
CASE	Nathan Miller	Tradução de elementos geométricos Rhinoceros em <i>Adaptative Components</i> no Revit e vice-versa	http://www.theprovingground.org

São cada vez mais as ferramentas de interoperabilidade que vão surgindo nesta área, o que demonstra o interesse do setor na utilização complementar de ambas as metodologias. Apesar de cada vez mais desenvolvida, a implementação dos processos de interoperabilidade está ainda numa fase de maturação, podendo criar obstáculos e falhas na transferência de informação, principalmente em modelos complexos. Naturalmente, estas dificuldades de interoperabilidade variam também conforme as plataformas base utilizadas tanto na modelação paramétrica como em BIM. Apesar disto, os desenvolvimentos recentes nos processos de interoperabilidade têm-se mostrado bastante promissores na dissipação das lacunas ainda existentes, esperando-se, por isso, num futuro recente, uma interoperabilidade mais eficiente (Boeykens, S., 2012).

Devido aos benefícios inerentes tanto à modelação paramétrica como à modelação BIM, é pertinente discutir a integração de ambas no processo de projeto, retirando benefício das vantagens de cada uma.

A modelação paramétrica pretende ser um suporte à modelação concetual, análises de desempenho preliminares, suporte de ferramentas de programação visual, integração de processos gerativos e colaborativos. Estes são os seus pontos fortes, que lhe permitem servir de suporte à tomada de decisão e avaliação de opções nas fases preliminares do projeto.

Por sua vez, as ferramentas BIM, são mais eficientes como ferramenta para centralizar a informação de forma estruturada, enriquecer a semântica do modelo, e extração de desenhos ou documentação. Os mecanismos de interoperabilidade estão cada vez mais desenvolvidos e eficazes catalisando cada vez mais a complementaridade e convergência de ambas as abordagens no processo de projeto, criando oportunidades para projetos mais eficientes e otimizados.

Mirtschin afirma que o grande benefício da complementaridade da modelação paramétrica, como processo gerativo, e a metodologia BIM é mais relevante na fase concetual, onde a identificação, análise e avaliação de opções tem maior impacto no produto final. Deste modo as ferramentas gerativas permitem grande flexibilidade na fase concetual, ao passo que as ferramentas BIM se revelam mais bem

adaptadas no que concerne à coordenação, gestão e documentação do projeto, típica das fases posteriores (Mirtschin, J., 2011).

Como exemplo, Van Berkel descreve como a UNStudio tirou partido da abordagem complementar entre processos gerativos e processos BIM em várias das suas obras, como a *Raffles City* em Hangzhou, China (2011). Os autores apelidaram esta abordagem complementar de *softBIM* (van Berkel, B., 2013).

Finalmente, Davis e Peters afirmam que a criação e coordenação do ambiente de projeto está-se a tornar, cada vez mais, do domínio do próprio projetista. Estes ambientes são orquestrados continuamente, permitindo-lhe ter uma relação próxima com as ferramentas que utiliza, interligando-as facilmente e da forma mais vantajosa em cada etapa particular do projeto, criando oportunidades para a inovação dentro do setor AEC (Davis, D. e Peters, B., 2013).

Em suma, a modelação paramétrica possibilita alicerçar uma série de outras ferramentas que, no seu conjunto, complementam e alargam os horizontes da modelação BIM como metodologia de gestão integrada da informação ao longo do ciclo de vida dos edifícios.













2.5. FERRAMENTAS DE MODELAÇÃO PARAMÉTRICA

O uso das TIC na AEC tem crescido exponencialmente nas últimas décadas. Para isso contribuíram os avanços tecnológicos nas ferramentas informáticas e das plataformas de comunicação dentro do setor.

Marsh e Flanagan distinguem quatro aspetos nos quais o impacto das TIC se revelam fundamentais para o sucesso da IC: a transferência, a captura, o armazenamento e a manipulação dos dados. É neste domínio que os fabricantes de ferramentas computacionais, focadas na IC, têm vindo a apostar. Hoje em dia, é cada vez mais diversificada a oferta de soluções para materializar computacionalmente os processos anteriormente discutidos. Não só os *softwares* de modelação 3D CAD, mas também os BIM, têm apostado na inclusão de funcionalidades de modelação paramétrica e de programação visual, como forma de fomentar a criação e análise de protótipos digitais. (Marsh, L. e Flanagan, R., 2000).

No quadro 2.2 resumem-se alguns dos principais *softwares* que têm introduzido ferramentas de modelação paramétrica, sendo por isso os potenciadores das metodologias discutidas neste capítulo.

Quadro 2.2 - Principais ferramentas de modelação paramétrica disponíveis atualmente.

Empresa	Softwares de modelação	Tipo de software	Modelação paramétrica	Possibilidade de scripting
Robert McNeil & Associates	Rhinoceros 	Modelação NURBS 3D; CAD	Grasshopper 	Programação Visual, Python, C#, VB.NET
Bentley Systems	Microstation 	Modelação NURBS 3D; CAD	Generative Components 	Programação C#
Bentley Systems	Bentley BIM suite 	BIM	Generative Components 	Programação C#
Gehry Technologies	Digital Project (baseado no CATIA) 	BIM	Incorporado no software 	Programação VB.NET
Autodesk	Revit 	BIM	Dynamo 	Programação Visual
Autodesk	Vasari Beta 	Modelação Concetual 3D com princípios BIM	Dynamo 	Programação Visual

3

TÉCNICAS EVOLUCIONÁRIAS DE OTIMIZAÇÃO DE PROBLEMAS

3.1. ENQUADRAMENTO GERAL

Atualmente a IC tende, cada vez mais, a basear a sua produção na padronização de componentes, formatos de ficheiros, diretrizes e regulamentos, que ditam requisitos ambientais, estruturais e de eficiência dos seus edifícios. Estes requisitos serão suficientes até certo ponto, mas nunca serão completamente sensíveis às necessidades de mudança de local, ao cliente ou ao ambiente que tornam cada edifício único. A IC é, talvez, a única que produz em quantidade, mas que não pode produzir em massa. Este é o original e mais abrangente caso, daquilo a que recentemente se começou a chamar de customização em massa (Hanna, S., 2013). Em 1973, Rittel e Webber, descreveram esta situação particular que os projetistas enfrentam em cada novo projeto como um “problema perverso” (Rittel, H.W. e Webber, M.M., 1973). Estes problemas são mal definidos logo à partida e requerem decisões não atestáveis de antemão devido ao seu contexto complexo e único, cujas consequências futuras são, por vezes, imprevisíveis (Hanna, S., 2013).

A conceção de projetos no domínio da AEC, de modo geral, parte de conceções abstratas que evoluem para critérios de projeto mensuráveis e objetivos. Na fase inicial, o foco do projeto alicerça-se principalmente em aspetos funcionais e estéticos do projeto, por norma ligados à arquitetura. Os aspetos que concernem ao comportamento e desempenho dos edifícios são apenas avaliados *a posteriori*, no domínio da Engenharia (Turrin, M. [et al.], 2011).

A inovação no setor sempre existiu, no entanto, sempre fundamentada em sólidas tradições e experiências das gerações anteriores. Hoje em dia, estas tradições de longa data encontram-se em desacordo com as exigências e desafios que se colocam aos projetistas. Começa a ser claro no setor que é essencial adotar novas metodologias de projeto e construção, que sejam flexíveis e adaptáveis (Hanna, S., 2013).

A procura da solução ótima num processo tão complexo como o projeto de um edifício é uma tarefa árdua e complexa. A equipa de projeto tem de ponderar múltiplos critérios, muitas vezes antagónicos ou sem relação intrínseca, e que, por sua vez, estão sujeitos a várias restrições. Assim, os profissionais vêm-se cada vez mais confrontados com exigências de projeto, para as quais a procura da melhor solução ultrapassa aquilo que é humanamente possível de discernir e, por isso, cada vez mais se socorrem de ferramentas para o apoio à decisão (Machairas, V. [et al.], 2014).

A AEC tira partido, rotineiramente, dos vastos recursos computacionais que tem ao seu dispor. Atualmente, o projeto tende cada vez mais a ser guiado pelo desempenho, utilizando simulações e otimizações computacionais, originando novas metodologias como o POD (Hanna, S., 2013). As

ferramentas de simulação do desempenho de edifícios, têm sido amplamente utilizadas pela comunidade de investigação, mas somente nas últimas duas décadas começaram a ser implementadas em casos práticos (Machairas, V. [et al.], 2014). Algumas destas ferramentas utilizam algoritmos de otimização para conseguirem pesquisar e localizar soluções.

Do vasto leque de algoritmos de otimização, a mais utilizada nestas ferramentas são os Algoritmos Evolucionários (AE) (Machairas, V. [et al.], 2014).

Os AE são um conjunto de métodos meta-heurísticos¹ de pesquisa e otimização de soluções baseadas nos princípios da seleção natural de Charles Darwin (1859) e na genética de populações de Ronald Fisher (1930). O termo evolucionário deriva da mimetização dos princípios da evolução biológica: reprodução, seleção, recombinação e mutação. Esta metodologia tem mostrado grande robustez na resolução de problemas matemáticos de domínio patológico ou contraintuitivos que exibem multimodalidade, descontinuidade, variação temporal, aleatoriedade ou ruído. Porém, para o engenheiro ou arquiteto que lida com estes algoritmos, o mais importante não está nas formulações matemáticas por detrás dos AE, mas sim nas suas propriedades de pesquisa e otimização de soluções que lhe permitam a compreensão geral do processo. Assim, no geral, qualquer abordagem iterativa baseada numa população que utilize seleção e variação aleatória para gerar novas soluções pode considerar-se um AE (Fleming, P.J. e Purshouse, R.C., 2002).

O desenvolvimento das metodologias evolucionárias encontra-se intimamente ligado à Computação Evolucionária (CE). A CE tem origem na década de 60, com trabalhos no âmbito da inteligência artificial de Fogel, Owens e Walsh (Owens, A.J. [et al.], 1966). Posteriormente vários outros autores aprofundaram e desenvolveram subconjuntos de técnicas evolucionárias, das quais se notabilizou o Algoritmo Genético (AG) introduzido por Holland (Holland, J.H., 1975) e popularizado por Goldberg (Goldberg, D., 1989), sendo, atualmente, a abordagem mais difundida e utilizada na CE (Fleming, P.J. e Purshouse, R.C., 2002).

Hoje em dia, no ramo da AEC, são vários os vetores que guiam o processo de conceção e concretização de qualquer projeto. Alguns dos mais usuais têm que ver com a solução estrutural, desempenho térmico ou acústico, componente estética, configuração espacial, sustentabilidade ambiental, restrições económicas e sociais ou métodos de fabricação e construção. Aos engenheiros e arquitetos incumbe a tarefa de definir e coordenar todos estes parâmetros e restrições que definem as fronteiras do projeto. Baseando-se nisto, deve então ponderar e optar pela solução ótima, ou pelo menos, a que mais favoreça o desempenho global do edifício – isto é, o melhor *trade-off* ou solução de compromisso (Davis, D. e Peters, B., 2013).

Encontrar uma solução que satisfaça todo o espectro de critérios de otimização possíveis de impor a um edifício, torna a missão humanamente impossível pelos métodos tradicionais de otimização, se a isso lhe forem ainda adicionadas todas as restrições (por exemplo, restrições dimensionais) inerentes às variáveis, a missão torna-se inimaginavelmente complexa sem o recurso a métodos computacionais meta-heurísticos como os AE.

O benefício chave dos AE é a sua notável flexibilidade. Estes algoritmos necessitam de muito pouca informação inicial para começarem o seu processo de pesquisa e otimização de soluções. Por isso, conseguem lidar com uma grande diversidade de formatos de variáveis de decisão (por exemplo, lidam

¹Qualquer técnica que descobre novas soluções, a partir da experiência ganha de soluções anteriores pode ser classificada como uma técnica meta-heurística (Fleming, P.J. e Purshouse, R.C., 2002).

bem com diferentes unidades SI das variáveis ou escolher o melhor perfil metálico dentro duma biblioteca). Além disto, os AE são ainda aplicáveis a técnicas de otimização multiobjectivo, os Algoritmos Evolucionários Multiobjectivo (AEMO) (Fleming, P.J. e Purshouse, R.C., 2002). Os AEMO lidam com situações em que existem duas ou mais funções objetivo para otimizar. Neste tipo de problemas são postos em conflito objetivos contraditórios, fazendo-se então um *trade-off* aos vários objetivos (ver subcapítulo 3.4.5). Existe ainda uma abordagem híbrida, onde são combinados vários algoritmos na resolução de um problema (Machairas, V. [et al.], 2014).

Estas características conferem aos AE uma grande abrangência na resolução e otimização de problemas em diversas áreas. Em particular na AEC, este tipo de ferramentas tem vindo a revelar-se um forte potenciador do processo de conceção e avaliação do projeto.

Engenheiros e arquitetos utilizam cada vez mais a computação para ensaiar os seus edifícios, incorporar análises de desempenho, conhecimento acerca de materiais ou parâmetros de produção nos seus projetos. As ferramentas de simulação computacional potenciam projetos mais adaptativos e com *feedback* e monitorização (praticamente) em tempo real, que, em conjugação com ferramentas de otimização permitem melhorar qualitativamente as soluções finais.

Em suma, as ferramentas de simulação aliadas às de otimização, desafiam o projetista a especular e ponderar sobre diversos cenários e optar pela solução que melhor responde às exigências de projeto, retirando o máximo potencial das construções (Peters, B., 2013).

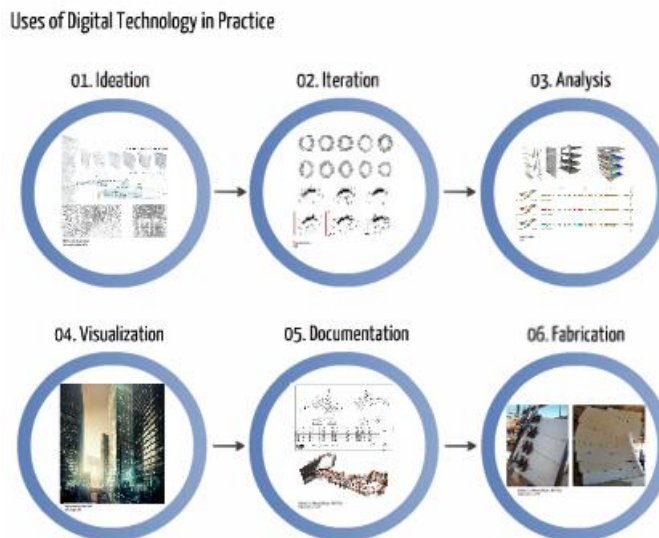


Figura 3.1 - Processo de conceção de projetos utilizando as tecnologias digitais: 1. Idealização; 2. Iteração; 3. Análise; 4. Visualização; 5. Documentação; 6. Fabricação. (Miller, N., 2013).

3.2. APLICAÇÃO DA COMPUTAÇÃO EVOLUCIONÁRIA NA AEC

As técnicas de otimização meta-heurísticas quase sempre implementam técnicas estocásticas na geração de soluções. A pesquisa aleatória - isto é, estocástica - destas técnicas não difere muito das técnicas puramente aleatórias (como o Método de Monte-Carlo), onde são escolhidos aleatoriamente pontos dentro do espaço de pesquisa. No entanto, apesar de este princípio ser bastante lógico num ponto de vista de tentativa e erro, é altamente ineficiente. Ao lidar com espaços de pesquisa multimodais e de múltiplas variáveis, o tempo necessário para encontrar uma solução ótima é completamente inaceitável

(Dimcic, M., 2011). No domínio da pesquisa estocástica, é possível encontrar um grande número de técnicas, muitas delas fundamentadas em fenómenos da natureza.

O Arrefecimento Simulado (Kirkpatrick, S. e Vecchi, M., 1983), que deve o seu nome à analogia com o processo termodinâmico envolvido no arrefecimento controlado dos metais usado em metalurgia, ou a Colónia de Formigas (Dorigo, M. e Gambardella, L.M., 1997), que se baseia na forma como as formigas exploram e otimizam os caminhos usados para descobrir alimentos, que pertence aos Algoritmos de Enxame (*Swarm Algorithms*). Ainda assim, a técnica mais difundida e aplicada atualmente, em termos computacionais, são os AG.

Devido à sua maior abrangência no domínio da CE, este trabalho foca-se principalmente nos AG e a sua aplicação na AEC. Algumas aplicações dos AG, no contexto da AEC, incluem a minimização dos gastos energéticos anuais; otimização de uma cobertura ou fachada em função dos níveis de luz solar anuais; otimização geométrica de edifícios; otimização de sistemas HVAC; análise de sustentabilidade; entre outras. Machairas *et al* descrevem algumas aplicações já desenvolvidas neste domínio, bem como a descrição e categorização do tipo de ferramenta e algoritmo utilizado (Machairas, V. [et al.], 2014).

3.3. PRÓS E CONTRAS DOS ALGORITMOS EVOLUCIONÁRIOS

Os AE no domínio da computação, quando comparados com outros métodos computacionais, são notavelmente flexíveis porque conseguem lidar com um largo espectro de problemas. A grande maioria dos problemas que se colocam na esfera da AEC, bem como na maioria das áreas, é resolúvel pelos AE. Os *evolutionary solvers* permitem um alto grau de interação com o utilizador. O utilizador pode refinar o problema de modo a impedir que o solucionador fique preso em soluções desinteressantes. Em oposição, pode também ser levado a explorar vários ramos de soluções ótimas.

Por outro lado, retornam sempre resultados, mesmo em problemas sub-restringidos ou sob-restringidos, ou problemas mal formulados. São também processos iterativos lentos. Quanto mais complexo for o problema, maior será o tempo necessário para completar cada iteração, o que também obviamente depende da capacidade de processamento computacional disponível.

Finalmente, não garantem uma solução, a menos que se predefina um valor como “suficientemente bom” ou um tempo máximo de processamento, o processo tenderá a correr indefinidamente sem nunca chegar a uma solução suficientemente satisfatória, ou tendo chegado a ela, não a reconhecer.

3.4. COMPUTAÇÃO EVOLUCIONÁRIA

3.4.1. ALGORITMOS GENÉTICOS APLICADOS À COMPUTAÇÃO

A modelação paramétrica é considerada como a ferramenta de suporte ao processo gerativo de projeto (Leach, N., 2009), como já discutido em 2.2. As ferramentas paramétricas baseiam-se em princípios algorítmicos no seu processo gerativo. Este processo, segundo (Dino, Í.G., 2012), requiere quatro elementos: as condições iniciais e os parâmetros (*inputs*); um processo gerativo (constituído por regras e algoritmos de modelação); o ato da geração de variantes (*outputs*); e finalmente a seleção da(s) melhor(es) variante(s). Deste modo, a geração de soluções de projeto é feita através da manipulação das variáveis (aqui entendidas como parâmetros) definidas algoritmicamente.

Os algoritmos são capazes de gerar e manipular computacionalmente entidades de projeto como formas geométricas, estruturas de dados, expressões matemáticas ou operações lógicas. Este nível de controlo do projeto permite ao projetista incrementar a produtividade, avaliar condicionantes de projeto, lidar apropriadamente com complexidades e responder-lhes de forma eficaz (Dino, Í.G., 2012).

Atualmente existe uma variada gama de ferramentas utilizadas na otimização do projeto de edifícios. Machairas *et al* mencionam várias ferramentas e aplicações na área (Machairas, V. [et al.], 2014). Destas, destacam-se principalmente ferramentas gerais de otimização como o modeFRONTIER (Esteco, 2014), o Matlab (Mathworks, 2014) e o GenOpt (Wetter, M., 2001) e ferramentas específicas para a AEC como o ParaGen (Turrin, M. [et al.], 2011) ou o BEopt (Christensen, C. [et al.], 2006).

Neste trabalho, como já foi referido, selecionou-se como ferramenta de modelação o Rhinoceros e a sua ferramenta de modelação algorítmica/paramétrica Grasshopper da Robert McNeel & Associates. O Grasshopper é referido no domínio computacional como uma ferramenta de programação visual, e numa perspetiva do utilizador como uma ferramenta de modelação algorítmica/paramétrica.

David Rutten desenvolveu, em conjunto com o Grasshopper, um *plug-in* para a aplicação de aplicação dos AG, chamado Galapagos. Há alguns meses, em 2013, surgiram outros dois componentes de aplicação de técnicas de otimização: o Goat (Flory, S., 2013), que introduz algoritmos alternativos aos do Galapagos e o Octopus, que aplica os AEMO (Grasshopper3d, 2013).

De um modo geral, os engenheiros e arquitetos possuem, por um lado, (pelo menos) um nível mediano no manuseamento de ferramentas de modelação, e por outro, pouco ou nenhum conhecimento de linguagens de programação. Neste contexto, este trabalho foca-se em ferramentas que vão ao encontro destes níveis de conhecimento. Baseado na literatura da especialidade, entendeu-se que as ferramentas acima mencionadas seriam aquelas que melhor preenchiam estes requisitos. Por um lado o Rhinoceros, é uma plataforma 3D CAD, familiar aos profissionais, por outro, o Grasshopper baseia-se em programação visual, bastante intuitiva, flexível e que requer poucos conhecimentos de linguagens de programação à partida.

As ferramentas de otimização são muitas vezes apelidadas de *Generic Solvers* (GS) ou *Evolutionary Solvers*, de ora em diante neste texto GS ou simplesmente *solver*. No entanto, apesar de serem apelidadas de genéricas, existem classes matemáticas de problemas que vão além da capacidade destes algoritmos. Neste subcapítulo pretende-se explorar a teoria subjacente à CE e à representação algorítmica de problemas. A obtenção e otimização de soluções dos GS depende do modo como os problemas são formalizados. Por isso, a compreensão do processo algorítmico por detrás das ferramentas é essencial para criticar e ajustar a formalização do problema e contornar algumas limitações dos *softwares*.

Assim, este texto pretende explorar o processo de otimização da CE, com base no *plug-in* Galapagos e a sua aplicação dos AG. Também, de forma expedita, discute-se a otimização multiobjectivo com recurso ao Octopus. A capacidade de modelação do Rhinoceros aliado ao Grasshopper faz desta uma plataforma que se adapta bem ao POD, visto que consegue lidar com vários tipos de conceção e contextualização de projetos e que se ajusta ao nível de conhecimento de programação habitual nos profissionais da AEC (Shi, X. e Yang, W., 2013).

3.4.2. DESCRIÇÃO GENÉRICA DO ALGORITMO GENÉTICO

Os AE trabalham com uma população de potenciais soluções para um problema. Cada indivíduo da população representa uma solução particular, que é expressa na forma de um código genético. A população é evoluída ao longo de várias gerações com intuito de produzir soluções cada vez melhores, isto é, mais próximas da função *fitness* (também chamada função custo ou objetivo) (Machairas, V. [et al.], 2014). A cada indivíduo é atribuída uma classificação de acordo com o seu *fitness*, que expressa o quão bom esse indivíduo (ou solução) é a resolver o problema. O valor *fitness* determina, probabilisticamente, o sucesso que cada indivíduo terá ao propagar o seu código genético às gerações

subsequentes. Assim quanto melhor for o desempenho do indivíduo mais alto será o seu valor *fitness* (Fleming, P.J. e Purshouse, R.C., 2002). Na figura 3.2 apresenta-se o esquema de iteração de um AG.



Figura 3.2 - Esquema do *loop* básico de um AE (Dimcic, M., 2011).

Em CE, as variáveis são referidas como genes, onde cada combinação de valores atribuídos a cada um dos genes (ou variáveis) forma um genoma. Quanto maior for o número de variáveis do problema, maior será o número de dimensões com que se irá lidar (Goldberg, D., 1989). Assim um problema com duas variáveis, será um problema a três dimensões, isto porque cada uma destas variáveis irá ser deformada pela função *fitness*. Assim, qualquer problema com mais de dois genes irá para além das dimensões que são possíveis de imaginar ou representar no espaço euclidiano, ficando por isso de certa forma abstrato.

Um espaço fásico, em matemática e física, define-se como o conjunto de todas as possíveis manifestações (ou estados) de um dado sistema (Mathematics, E.o., 2014). Por exemplo, se dois pontos A e B se puderem mover livremente num sistema de coordenadas XY, ter-se-á um sistema de 4 variáveis (as coordenadas X e Y de cada ponto), onde todas as combinações de posições possíveis dos pontos representam as manifestações possíveis do sistema, sendo cada uma delas um ponto no espaço fásico.

Neste contexto, um problema define-se como a extrusão do espaço fásico, e a solução como o ponto mais alto criado por essa extrusão (Rutten, D., 2013). Na figura 3.3, o espaço fásico é o terreno *fitness* ilustrado, o qual é definido pelo conjunto de todas as possíveis combinações de variáveis do sistema, ou seja, é uma coleção de todos os genomas existentes no sistema. Daqui depreende-se que a morfologia do terreno *fitness* é definida através do conjunto de todas as manifestações possíveis dos genomas do problema.

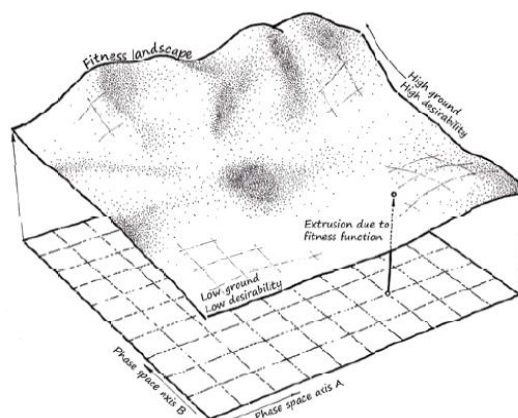


Figura 3.3 - Relação entre um espaço fásico bidimensional e o terreno *fitness* tridimensional resultante (Rutten, D., 2013).

Na figura 3.4 está representado um terreno *fitness* que contém dois genes A e B. Se o gene A se mover, o estado do modelo altera-se, tornando-se melhor ou pior. Será melhor se o movimento resultar numa posição mais elevada no terreno *fitness* e pior caso contrário. Mas para cada valor do gene A é possível fazer variar também o gene B. Cada combinação de A e B irá resultar num valor *fitness* específico, que quanto mais alto for, melhor será a solução. A função dos GS é encontrar o pico mais alto no terreno *fitness*, ou seja, a solução que otimiza o problema.

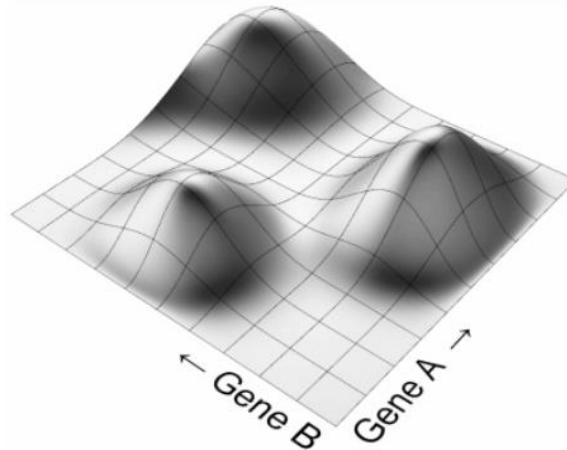


Figura 3.4 - Terreno *fitness* (Rutten, D., 2010).

Quando o *solver* inicia, na geração zero, o processo não sabe qual a morfologia do terreno *fitness* com que está a lidar. O primeiro passo será então povoar o terreno com um conjunto aleatório de indivíduos (genomas), os quais serão avaliados e classificados individualmente de acordo com o seu *fitness* (figura 3.5).

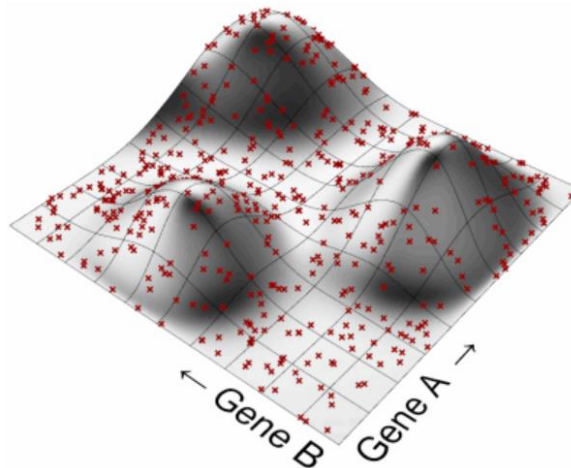


Figura 3.5 - Geração zero: Terreno *fitness* povoado aleatoriamente (Rutten, D., 2010).

Após criada a hierarquia dos indivíduos, é razoável assumir que aqueles que se encontram mais elevados no terreno terão maior potencial de chegar aos picos de terreno. Assim os genomas com pior desempenho podem ser extintos, permitindo ao algoritmo focar-se apenas nos melhores (figura 3.6).

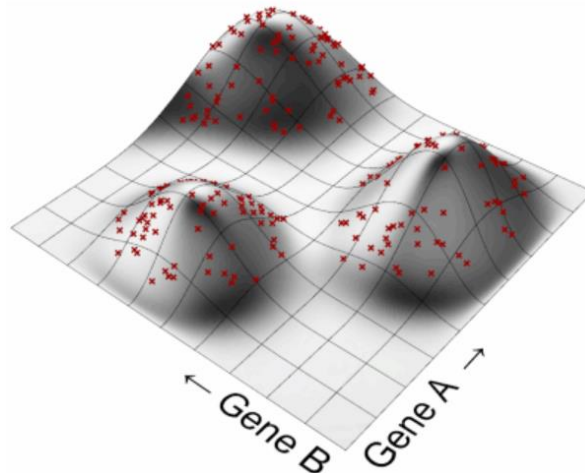


Figura 3.6 - Indivíduos com melhor desempenho na geração zero (Rutten, D., 2010).

Após a seleção dos melhores indivíduos da geração zero, procede-se ao cruzamento destes, criando uma nova geração. Quando dois genomas são cruzados o seu descendente irá estabelecer-se algures no espaço intermédio de terreno *fitness* dos seus antecessores, fazendo com que este genoma explore novo terreno. Esta nova geração criada já não é completamente aleatória e começa a concentrar-se junto dos três picos de terreno, um dos quais será o ótimo (figura 3.7). Por vezes, o cruzamento de indivíduos não é suficiente para explorar todo o espaço de pesquisa, podendo levar o processo de otimização a convergir para um ótimo local. De forma a diversificar a população é introduzido um fator adicional para que todo o espaço de pesquisa seja percorrido, a mutação (Dimcic, M., 2011).

O processo vai então repetir-se com a criação de novas gerações baseadas nas antecessoras, extinguindo os indivíduos com pior desempenho à qual se segue o cruzamento e mutação dos que têm maior *fitness*, até que se atinja o pico mais alto no terreno *fitness*. O processo envolve quatro partes interligadas - Função *fitness*; Mecanismo de Seleção; Mecanismo de Recombinação; e Mecanismo de Mutação – que são desenvolvidos com mais pormenor no próximo subcapítulo, 3.4.3.

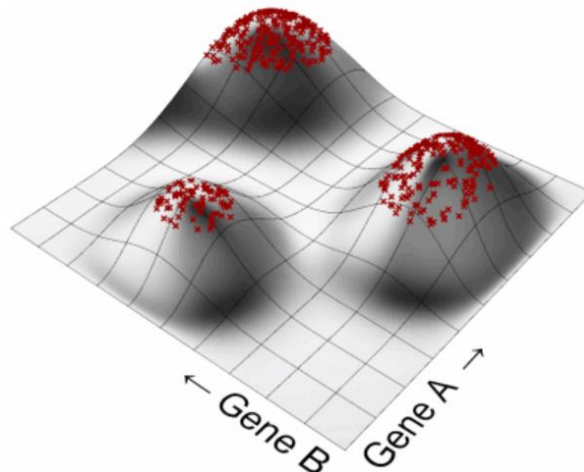


Figura 3.7 - Geração 1 (Rutten, D., 2010).

Existe uma grande aleatoriedade em todo processo dos *solvers*, no entanto é possível distinguir uma tendência nos genomas descendentes: cada individuo tentará sempre maximizar o seu próprio *fitness*,

para que se posicione o mais acima possível na hierarquia e assim ter mais hipóteses de ser eleito para gerar descendência. Assim, da mesma maneira que a água desce sempre pela encosta mais íngreme, os genomas procuram o caminho mais eficaz para maximizar o seu *fitness*, ou seja, tendem a subir ao longo do declive mais acentuado. Na figura 3.8 ilustra-se um possível caminho dos descendentes de um genoma ancestral, representado pelo ponto preto.

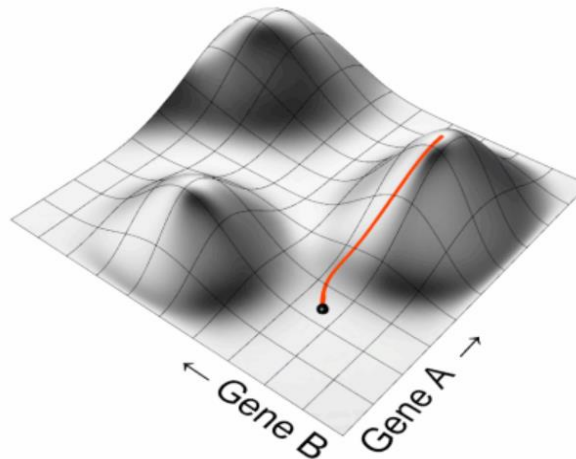


Figura 3.8 - Caminho dos genomas descendentes do genoma representado pelo ponto preto, em busca da maximização do seu *fitness* (Rutten, D., 2010).

Neste processo, os genomas mais bem sucedidos são aqueles que sobem mais rapidamente ao longo das encostas em direção aos pontos mais altos, sendo os menos eficazes nesta tarefa eliminados. Assim, cada pico do terreno *fitness* gera à sua volta uma base de atração como ilustrada na figura 3.9. É de ressaltar que a área da base de atração não tem qualquer significado em relação à qualidade do pico. Na verdade, uma boa solução pode ter uma base de atração bastante pequena e uma má solução ter uma grande área de atração. Problemas deste tipo são muito difíceis para o *solver* porque podem fazê-lo ficar preso em ótimos locais.

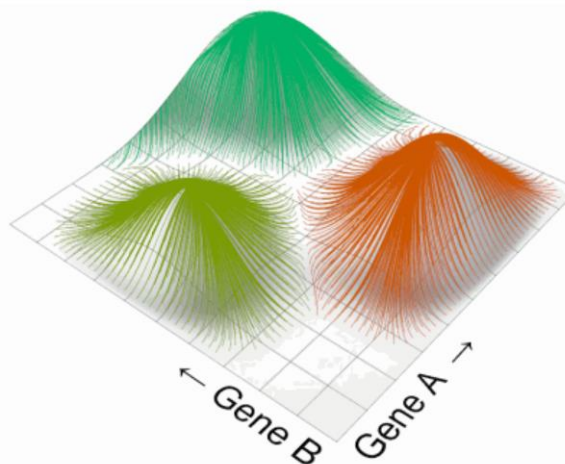


Figura 3.9 - Bases de atração à volta das três potenciais soluções ótimas (Rutten, D., 2010).

3.4.3. ANATOMIA DOS *GENERIC SOLVERS*

3.4.3.1. Função *fitness*

Ao contrário do que acontece na evolução biológica, em computação *fitness* é um conceito mais objetivo e mensurável. Em CE, quando se formaliza um problema, os objetivos estão claramente definidos *à priori*. Assim, ser *fit* não é mais do que o indivíduo que melhor se encaixa nos objetivos do problema.

Imagine-se um problema cujo objetivo é maximizar a sombra de uma cobertura paramétrica esquematizada na figura 3.10. No contexto deste problema apenas se estuda uma posição do sol específica como simplificação, em que a direção dos raios solares incidentes é representada por um vetor $(-1;-1;-1)$ que passa na origem do referencial XYZ e que, portanto, faz 45° com cada um dos eixos, como mostrado na figura 3.11.

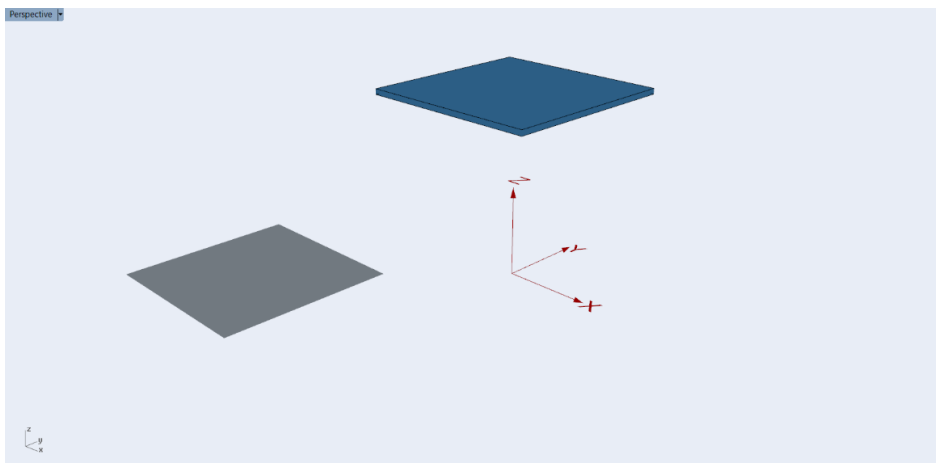


Figura 3.10. Esquema da Cobertura Paramétrica e respetiva sombra na configuração base.

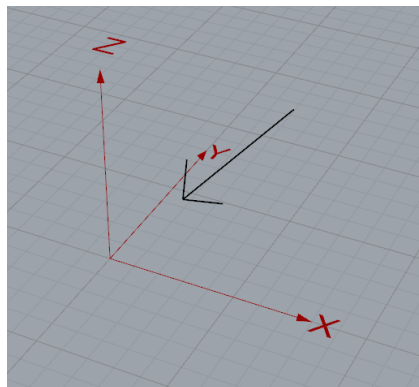


Figura 3.11 - Direção dos raios solares incidentes em relação ao sistema coordenado XYZ.

A cobertura paramétrica pode tomar diferentes configurações que resultam, por sua vez, em diferentes formas e áreas sombreadas. Na sua configuração base da figura 3.10, é uma cobertura plana quadrada com 10 m de lado. O sistema paramétrico é constituído por duas variáveis que fazem variar a forma da cobertura. As variáveis estão associadas aos vértices da cobertura que se podem mover ao longo das arestas verticais (segundo Z) de um cubo de 10 m de aresta cuja base está 5 m acima do nível terreno (plano XY) como mostrado na figura 3.12. A cota dos vértices pode variar entre os 5 e os 15 m, sendo aqui este intervalo de variação definido entre 0 e 1, cota 5 e 15 m respetivamente. Na figura 3.12 apresenta-se o cubo que delimita a variação dos vértices A, B, C e D da cobertura.

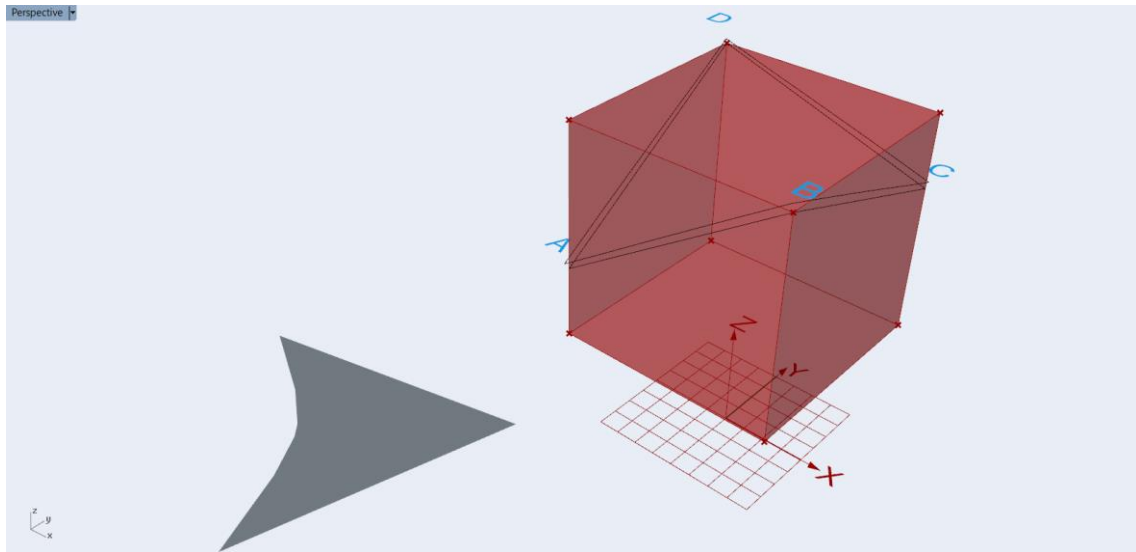


Figura 3.12 - Cubo que delimita a variação dos vértices da cobertura.

O sistema paramétrico é constituído por duas variáveis. Uma primeira, Gene X, controla os vértices A e C e faz com que estes se movimentem inversamente – por exemplo, quando A toma o valor 0.75 ou 0.30, C toma o valor 0.25 ou 0.70, respetivamente, e assim sucessivamente no domínio de variação 0 a 1. A segunda variável, Gene Y, controla os vértices B e D e movimenta ambos os vértices com o mesmo valor de cota. Para este exemplo foram agrupados os vértices em pares para que o sistema resulte num terreno *fitness* tridimensional. Caso se variassem, de forma independente, os quatro vértices, estaríamos perante um sistema com 5 dimensões, que traria complexidade desnecessária à explicação. Nas figuras 3.13, 3.14 e 3.15 apresentam-se várias configurações possíveis da cobertura resultantes da variação de ambos os parâmetros. Por outras palavras, representam-se alguns genomas do sistema.

Quando o processo se inicia, o Galapagos vai criar aleatoriamente indivíduos que dão origem à população inicial. O número de indivíduos normalmente está entre 50 e 200 indivíduos, cujo valor é possível definir *à priori*. Neste caso definiu-se 100 indivíduos. Para cada indivíduo criado, o algoritmo vai escolher aleatoriamente um valor para cada gene, definindo um genoma. Após povoar aleatoriamente o terreno *fitness* serão escolhidos os indivíduos que resultam numa maior área sombreada (isto é, têm maior *fitness*) para gerarem descendência.

Após correr o Galapagos, foi possível obter as soluções que otimizam o problema, ou seja, que resultam na máxima área sombreada. Neste caso obteve-se como valor ótimo 200 m². Existe um conjunto de genomas cuja área sombreada é máxima, não existindo, por isso, uma solução única. Este resultado seria de esperar, uma vez que apenas o Gene X influencia a área sombreada. O Gene Y é uma variável neutra porque não altera a área sombreada, retornando apenas configurações diferentes desta. No entanto, sendo este um exercício de demonstração, o Gene Y serve para demonstrar que o *solver* é capaz de identificar as diferentes soluções que maximizam o problema. Qualquer solução, em que o ponto A e C estejam à cota máxima e mínima respetivamente, retornará uma área máxima. Na figura 3.13 e 3.14 mostram-se duas configurações cuja área resultante é 200 m². Na figura 3.15 ilustra-se uma situação longe do ótimo, sendo provavelmente fruto de uma das gerações iniciais. Olhando para os valores atribuídos pelo *solver* ao genoma de cada solução, verifica-se que o Gene X maximiza a área de sombra quando assume o valor 1, e que o Gene Y pode tomar qualquer valor sem influenciar na área.

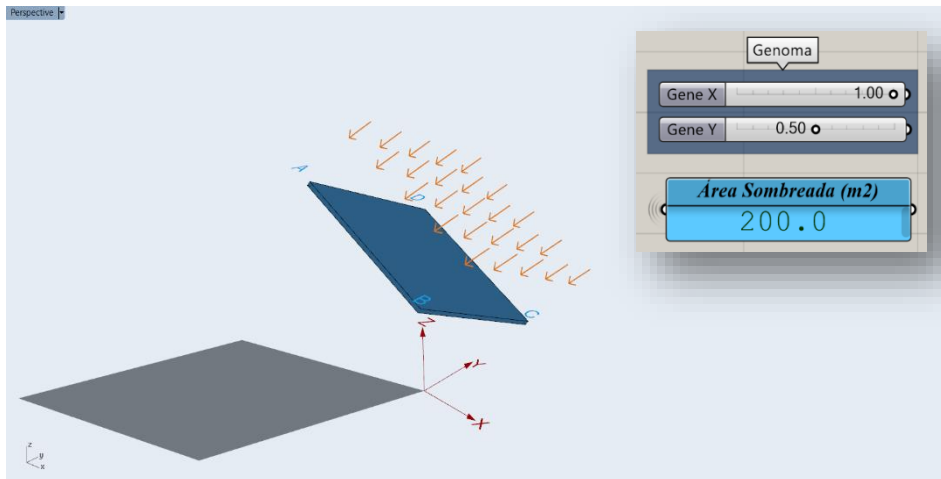


Figura 3.13 - Exemplo de genoma maximizante: cobertura plana.

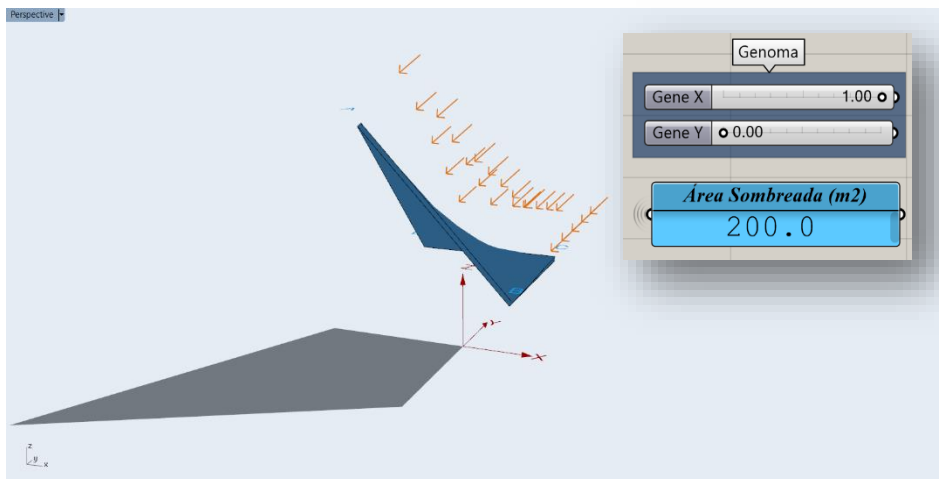


Figura 3.14 - Exemplo de genoma maximizante: cobertura *free-form*.

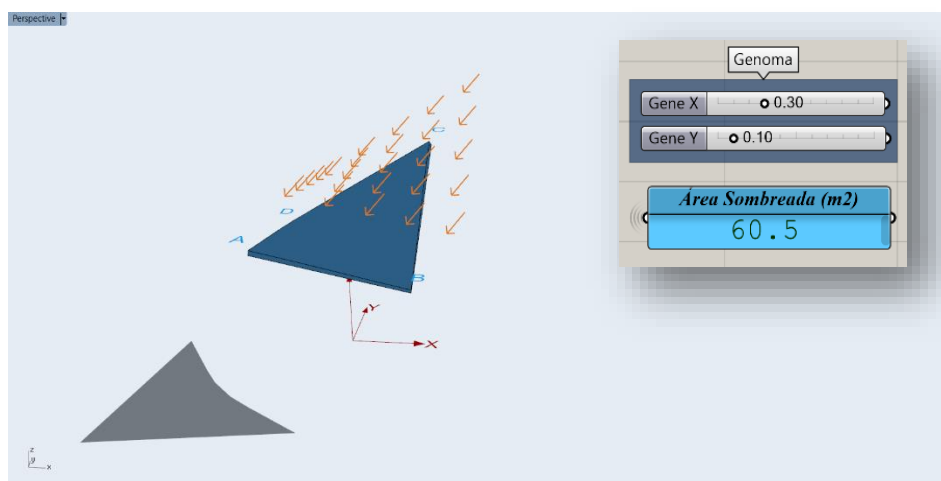


Figura 3.15 - Genoma de configuração não maximizada.

A grande maioria das situações de otimização com que os engenheiros e arquitetos se deparam, envolvem maximização ou minimização de múltiplas variáveis, como já discutido anteriormente. Apesar dos *solvers* serem uma ferramenta eficaz para obter soluções, algumas particularidades dos problemas com que este lida podem dificultar o seu processo de pesquisa e obtenção de soluções. Horn e Goldberg discutem em profundidade as dificuldades que a morfologia dos terrenos *fitness* pode oferecer ao desempenho dos AG (Horn, J. e Goldberg, D.E., 1994). No entanto, do ponto de vista dos profissionais da AEC, importa perceber estas particularidades numa perspetiva mais genérica e aplicada às ferramentas informáticas disponíveis. Na figura 3.16 ilustra-se um gráfico bidimensional do terreno *fitness* do problema em estudo. É um gráfico linear, porque existe apenas um valor, que otimiza a área, embora esta se revele em vários genomas.

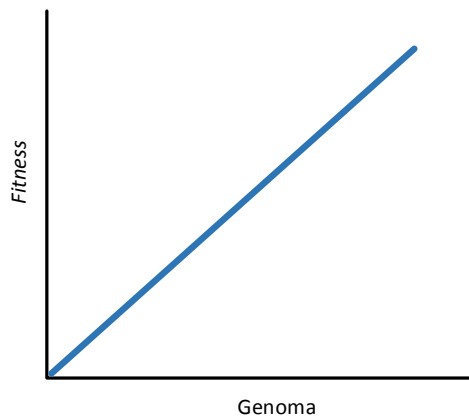


Figura 3.16 - Gráfico bidimensional do terreno *fitness* da cobertura paramétrica.

Ao contrário do que acontece neste problema de demonstração, existem problemas cujos GS podem ser levados a ficar detidos em ótimos locais. Na figura 3.17 está representado um gráfico com dois tipos de soluções: duas soluções de alta qualidade (máximos globais) e uma de má qualidade (máximo local). Neste caso, as bases de atração dos picos entram em conflito, fazendo com que metade dos genomas sejam atraídos para a solução de má qualidade.

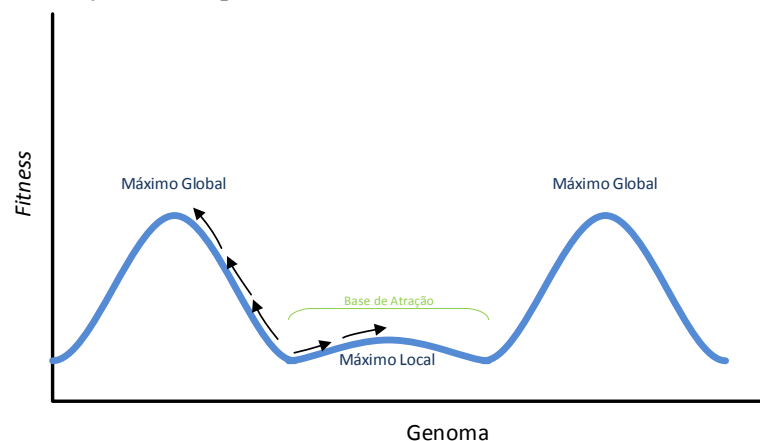


Figura 3.17 - Representação gráfica de um terreno *fitness* com ótimo local (Rutten, D., 2010).

Outra situação, ainda mais problemática, acontece quando a base de atração dos picos é muito fraca (plana) e, portanto, é fácil que o ótimo à direita, na figura 3.18, não seja encontrado. Com a aleatoriedade na população, se um indivíduo encontrar a encosta do pico à esquerda será premiado com um *fitness* mais alto, causando que toda a sua descendência seja atraída para esse pico, extinguindo o resto da população. Então quanto mais pequena for a base de atração de uma solução, mais difícil será para os AE resolver o problema.

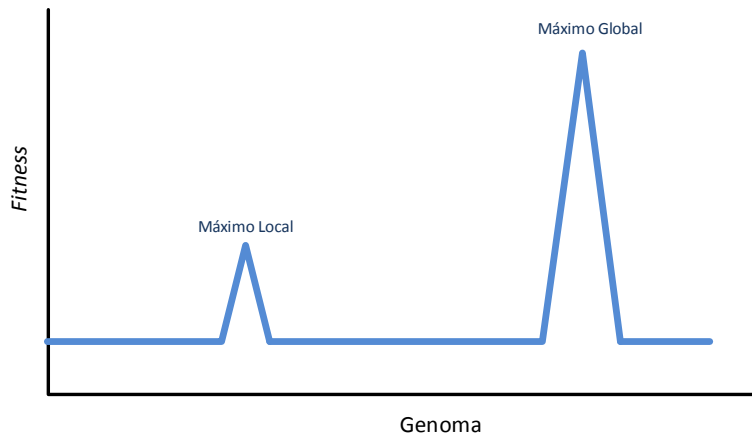


Figura 3.18 - Problemas devido a uma base de atração fraca (Rutten, D., 2010).

Os problemas com o terreno *fitness* em escada (figura 3.19) são também problemáticos para estes algoritmos. Nestes problemas existem soluções ótimas, quer locais quer globais, mas não existem picos que as definam inequivocamente. Em vez disso existem degraus que definem as soluções ótimas. Quando um genoma se encontra num degrau não sabe o melhor caminho: quer explore caminho à sua direita ou esquerda não haverá melhorias do seu estado *fitness*. A isto chama-se um terreno *fitness* sem pressão porque os genomas vão navegar sem rumo até que um tenha a “sorte” de repentinamente subir de patamar. Assim que sobe de patamar, o genoma vai rapidamente dominar a *genetic-pool*² (Marshall, B., 2001) e fazer com que o processo descrito se reinicie até que o próximo degrau seja acidentalmente encontrado.

Um cenário ainda pior que os anteriores é um terreno *fitness* caótico. Estes terrenos são de tal forma sinuosos que se torna muito difícil para os algoritmos explorar terreno e melhorar o *fitness* das soluções. Em terrenos deste tipo é possível que dois genomas com *fitness* alto gerem descendentes com *fitness* baixo, isto é, que se situem numa das “fissuras” do gráfico da figura 3.20.

²*Genetic-Pool* ou *Gene-Pool* é o conjunto de genes, ou informação genética, em qualquer população de uma dada espécie. Quanto maior for a *Genetic-Pool* maior será a diversidade genética.

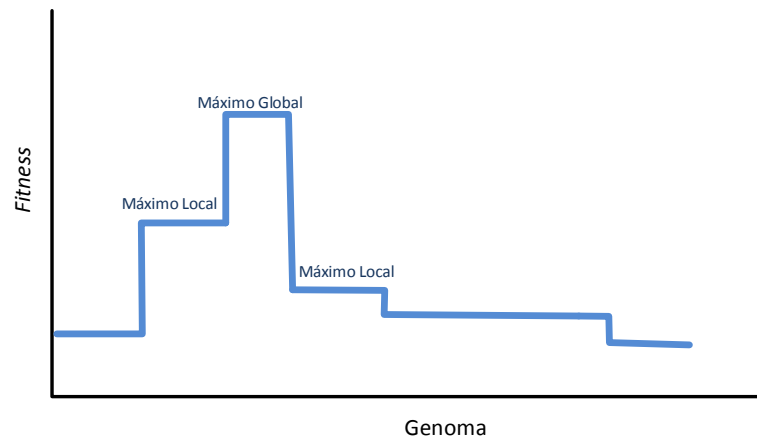


Figura 3.19 - Problemas com terreno *fitness* sem pressão (Rutten, D., 2010).

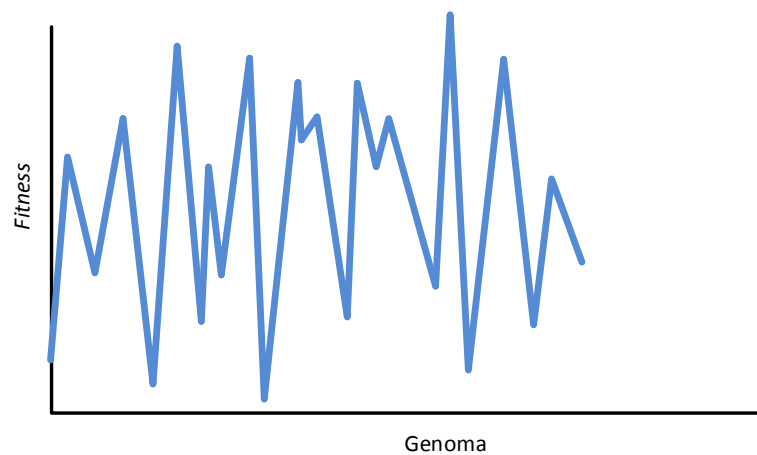


Figura 3.20 - Problemas com terreno *fitness* caótico (Rutten, D., 2010).

3.4.3.2. Mecanismo de seleção

A seleção natural de Darwin é um mecanismo de arbítrio da evolução biológica. A seleção natural afeta a direção da *genetic-pool* ao longo das gerações, regulando os cruzamentos dentro das espécies. No domínio da CE o mecanismo de seleção assemelha-se a outro tipo de seleção há muito utilizada pelos humanos, a seleção artificial, que permite introduzir características específicas numa espécie. Este mecanismo permite o controlo das características herdadas pelas gerações subsequentes, e por conseguinte, direcionar a *genetic-pool* para produzir descendência que convirja mais rapidamente para as soluções pretendidas.

Após a criação aleatória da geração zero é necessário selecionar os genomas que irão gerar descendência. Existem vários mecanismos de seleção parental que se encontram extensivamente descritos em (Baker, J.E., 1987, Goldberg, D.E. e Deb, K., 1991). Este documento versa-se apenas nos mecanismos de seleção disponíveis no Galapagos que, no entanto, permitem compreender os princípios inerentes a todos os mecanismos.

O primeiro mecanismo, e também o mais simples, é a seleção isotrópica (figura 3.21). Nesta seleção todos os genomas são eleitos para cruzamento. Aparentemente este tipo de estratégia não melhora a evolução da *genetic-pool* já que os membros menos *fit* são eleitos para reprodução. Este fenómeno é

análogo ao que acontece com as polinizações das flores através do vento (anemofilia). Por um lado, este amortece a velocidade com que a população evolui o seu *fitness*, mas por outro atua como uma segurança contra a colonização prematura de possíveis ótimos locais.

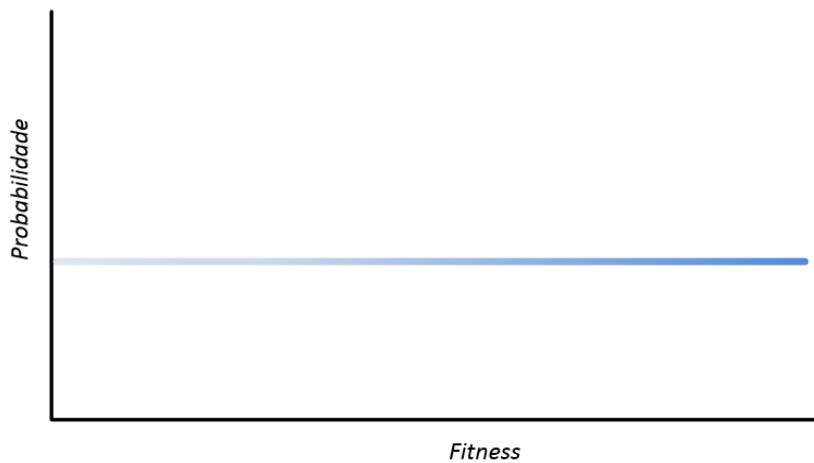


Figura 3.21 - Seleção Isotrópica (Rutten, D., 2010).

Outro mecanismo disponível é a seleção exclusiva (figura 3.22), onde apenas os melhores N% da população são selecionados para reprodução, tendo a oportunidade de deixar múltiplos descendentes. Este processo é análogo ao que acontece com os machos morsa que lutam entre si, onde o vencedor tem a oportunidade de acasalar com várias fêmeas.

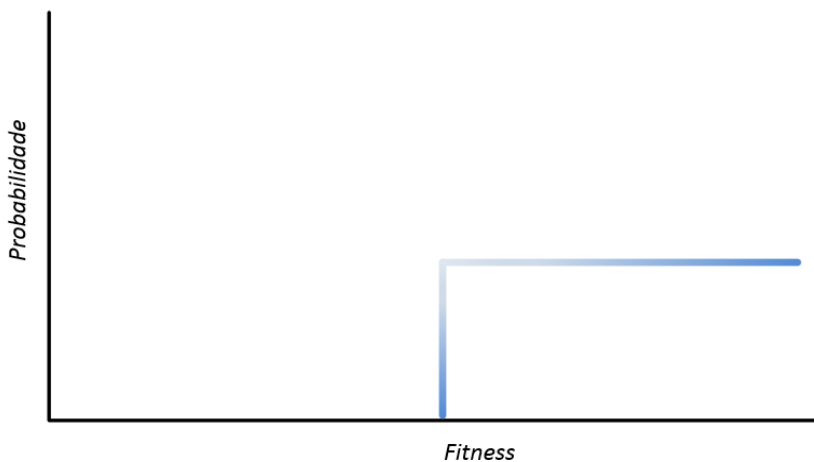


Figura 3.22 - Seleção Exclusiva (Rutten, D., 2010).

Por último, o Galapagos disponibiliza a seleção tendenciosa (figura 3.23), onde a probabilidade de um indivíduo ser selecionado para deixar descendentes é proporcional ao seu valor *fitness*. Este é um comportamento típico em espécies que formam casais estáveis. Todos estão aptos para arranjar parceiro, no entanto os indivíduos mais atrativos terão mais hipóteses de se cruzarem com os parceiros mais atrativos. Do ponto de vista da CE, quanto maior for o valor *fitness* de um indivíduo maiores serão as chances de este se cruzar com um indivíduo de elevado *fitness*, tendo, por isso, maior preponderância nas gerações futuras. Este tipo de seleção pode ainda ser manipulada através de funções exponenciais

ou logarítmicas de modo a exacerbar as reais possibilidades dos indivíduos, e assim alterar a direção da *genetic-pool*.

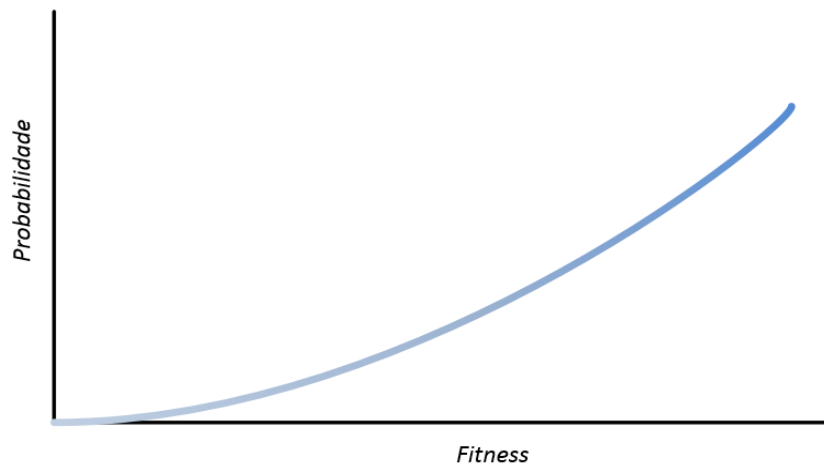


Figura 3.23 - Seleção Tendenciosa (Rutten, D., 2010).

3.4.3.3. Mecanismo de recombinação

Após o processo de seleção estar concluído (onde alguns indivíduos são extintos), os indivíduos selecionados estão preparados para a reprodução. Alguns destes são simplesmente copiados para a geração seguinte e outros são recombinados. A recombinação de indivíduos tem por objetivo tornar o processo de convergência mais expedito e garantir a diversidade de soluções. A recombinação ou cópia dos indivíduos selecionados é feita através do fator de probabilidade de recombinação. Este fator deve ser bem ponderado de modo a permitir a replicação de boas soluções (sobrevivência dos mais *fit*) por um lado, e ainda assim possibilitar a exploração do espaço de pesquisa através da recombinação destes (Dimcic, M., 2011). A recombinação, também chamada de operador de cruzamento, envolve a troca de material genético entre os cromossomas (pais), de forma a criar novos cromossomas (descendentes) (Fleming, P.J. e Purshouse, R.C., 2002). Este mecanismo é composto por duas fases. A primeira envolve um algoritmo de acoplamento que determina o “companheiro” para cada indivíduo. Depois de atribuídos os casais é necessário decidir que material genético o descendente vai receber de cada um dos seus “progenitores”. Esta tarefa é levada a cabo por um algoritmo de coalescência³ ou aglutinação genética.

Algoritmo de Acoplamento

O acoplamento é o processo de encontrar companheiros. Este processo pode ocorrer de várias formas como as descritas por Goldberg (Goldberg, D., 1989), no entanto o Galapagos atualmente apenas disponibiliza a seleção de companheiros baseados na distância genómica. Em primeiro lugar é necessário esclarecer o conceito de mapa genómico. No mapa genómico ilustrado na figura 3.24, cada ponto representa um genoma que foi selecionado para cruzamento. A distância entre cada genoma é aproximadamente análoga à distância entre os genomas na sua representação N-dimensional (em que N

³Coalescência é um modelo de retrospectiva da genética populacional. Faz uma abordagem genealógica de modo a fazer uma aglutinação dos genes compartilhados por uma população com os seus ancestrais.

é o número de genes). Cada genoma é definido por N genes e, portanto, a distância entre genomas é um valor N -dimensional, o qual é impossível de representar num espaço bidimensional para valores de N maiores que 2. A única informação que o mapa genómico fornece é a similaridade entre os genomas: quanto mais perto mais semelhantes serão.

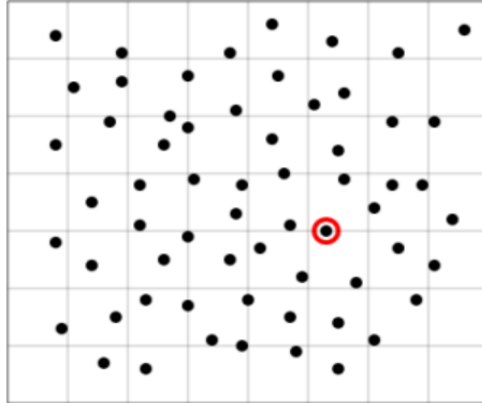


Figura 3.24 - Mapa Genómico (Rutten, D., 2010).

Uma vez que os genomas representados são apenas aqueles que foram eleitos pelo algoritmo de seleção, é necessário agora decidir quais os que se ligam com quais. Imagine-se o genoma marcado a vermelho na figura 3.24. O primeiro cenário será que o genoma se limite à sua vizinhança próxima. Isto significa que o seu companheiro vai ser bastante semelhante a si próprio (figura 3.25a). No domínio da CE, este tipo de acoplamento é chamado de incestuoso porque implica o rápido declínio da diversidade populacional. A baixa diversidade diminui as probabilidades de encontrar soluções alternativas e, assim, o *solver* ficar retido em ótimos locais.

Outro cenário possível será excluir toda a vizinhança, como ilustrado na figura 3.25b. A certo ponto os genomas mais longe no mapa genómico tornam-se de tal maneira diferentes que se tornam incompatíveis. Na CE chama-se a este fenómeno cruzamento zoófilo e pode também ser prejudicial para a população. Isto acontece quando uma população se divide em subespécies de genomas, em que cada uma se encontra a explorar um pico diferente do terreno *fitness* (figura 3.25c). Quando se cruzam dois indivíduos de subespécies diferentes a sua descendência irá situar-se algures no espaço de terreno *fitness* compreendido entre os seus antecessores. Se os seus antecessores estiverem já elevados no terreno, o descendente, provavelmente, irá ficar num vale a cota mais baixa, e portanto piorará o *fitness* em relação ao dos seus antecessores. O último cenário possível é uma solução de compromisso entre estes dois cenários, ou seja, seleccionar indivíduos que não estejam nem muito distantes nem muito próximos no mapa genómico, como mostrado na figura 3.25d.

A ferramenta Galapagos permite especificar o fator de acoplamento, que varia entre -100%, acoplamento totalmente incestuoso (figura 3.25a) e +100%, acoplamento completamente zoófilo (figura 3.25b).

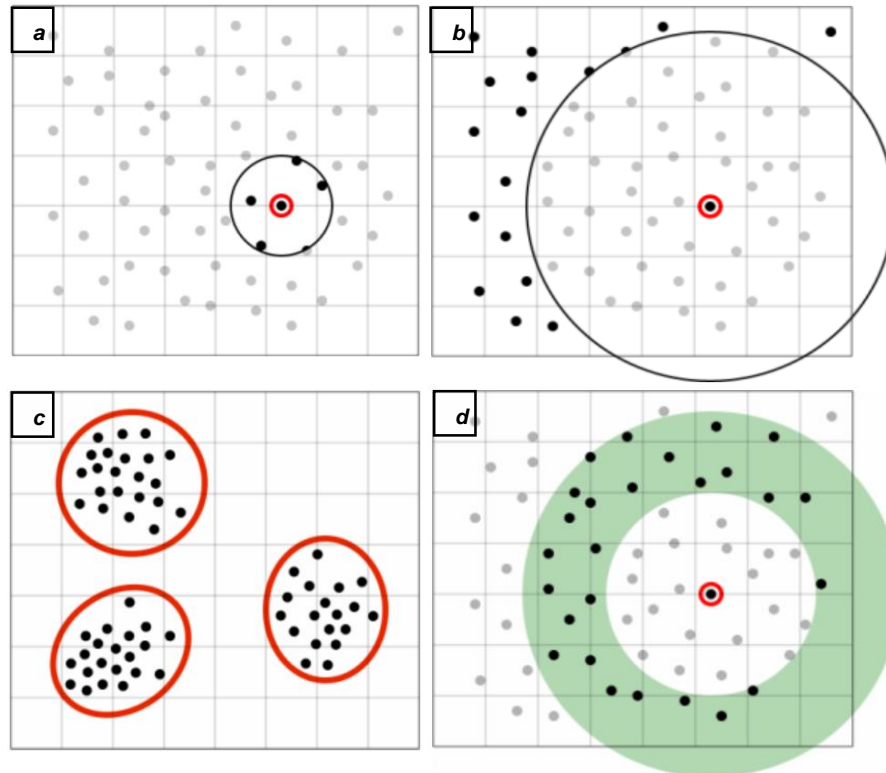


Figura 3.25 - Mapas genómicos: a) Acoplamento com indivíduos próximos (incestuoso); b) Acoplamento com indivíduos distantes (zoófilo); c) Agrupamento em subespécies de genomas; d) Acoplamento equilibrado. (Rutten, D., 2010).

Algoritmo de Coalescência

Depois de terem sido atribuídos companheiros a todos os genomas, é necessário decidir que valores atribuir aos genes dos indivíduos descendentes. Nos AE, os genes ou variáveis são representados por pontos flutuantes que podem assumir qualquer valor entre dois extremos predefinidos. As leis de Mendel na genética definem, simplificada e como exemplo, que se dois indivíduos, um por natureza moreno e outro por natureza de pele clara gerarem descendência, este novo indivíduo terá um tom de pele com uma tonalidade alvura entre a dos seus antecessores. Do ponto de vista da CE, o algoritmo de coalescência vai, de modo análogo, definir que genes devem passar à descendência e com que valores. Em CE, no entanto, este processo está isento de características baseadas no género e outros aspetos que tornam complexas as leis de Mendel na área da genética.

De modo a exemplificar, tomem-se dois genomas A e B compostos por quatro genes cada, que irão recombinar-se para gerar AB. Um dos processos disponíveis no Galapagos é uma mimica do processo biológico de recombinação de genes chamado Cruzamento Coalescente. Neste processo, o descendente vai herdar um número aleatório de genes de A e os restantes de B. Assim, os valores dos genes são mantidos. Este processo é especialmente adequado quando A e B são já bastante similares. Outro processo é a Mistura Coalescente, onde são calculados novos valores para os genes do descendente, basicamente através da média dos genes de A e B. Por último, existe o processo da Mistura Preferencial Coalescente, que é similar ao anterior, mas adiciona uma preferência nos genes do descendente baseado no *fitness* dos seus geradores. Por exemplo, se A tiver maior valor *fitness*, então os seus genes terão maior peso no valor calculado dos genes de AB. Na figura 3.26 mostram-se os três processos descritos.

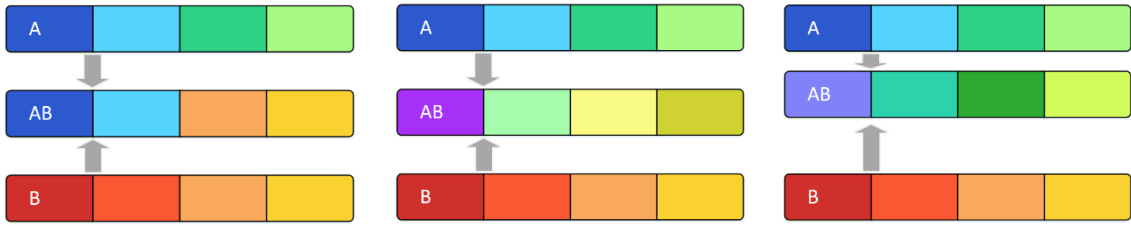


Figura 3.26 - Da esquerda para a direita: Cruzamento Coalescente; Mistura Coalescente; Mistura Preferencial Coalescente (Rutten, D., 2010).

3.4.3.4. Mecanismo de mutação

Os mecanismos de mutação desempenham o papel de garantir que o material genético não se perde ao longo das gerações, possibilitando recuperar algum deste material que se perdeu no processo de seleção e recombinação (Fleming, P.J. e Purshouse, R.C., 2002). Todos os mecanismos discutidos atrás servem para melhorar a qualidade das soluções nas gerações seguintes. No entanto, todos eles tendem a reduzir a diversidade genética das populações. A mutação é o único mecanismo que permite introduzir diversidade na *genetic-pool*. As técnicas de mutação são diversas, com variados autores a sugerirem adaptações e evoluções das técnicas base descritas por (Holland, J.H., 1975). Atualmente, por limitações da interface Grasshopper, o *plug-in* Galapagos permite apenas a mutação de pontos, no entanto, encontram-se já previstas outros tipos de mutação a disponibilizar futuramente (Rutten, D., 2010). Na figura 3.27, encontra-se representado um gráfico de um genoma composto por 5 genes, G0 a G4, representado no eixo horizontal. No eixo vertical representa-se a variação relativa de cada um dos genes entre 0 e 1. A título de exemplo, o gene G0, cujo valor no gráfico se encontra a 1/3, significa que o valor real desse gene é um terço do intervalo de variação predefinido para o gene.

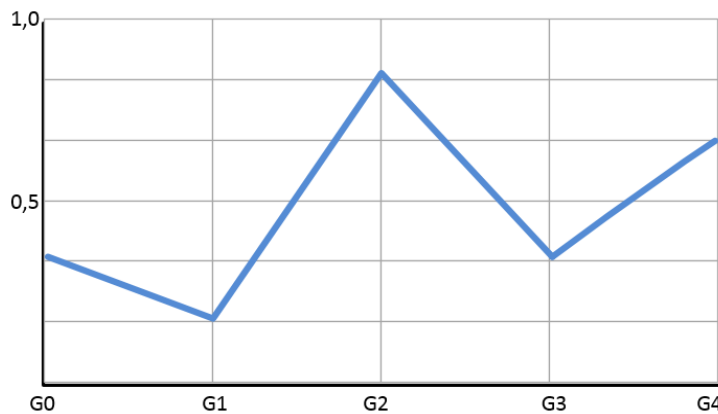


Figura 3.27 - Gráfico Genómico (Rutten, D., 2010).

A Mutação de Pontos encontra-se ilustrada na figura 3.28a, onde o valor de G2 é mutado, passando a tomar um novo valor. O outro tipo de mutação possível no Galapagos atualmente é a Inversão de Pontos, onde os valores de dois genes adjacentes são trocados (figura 3.28b).

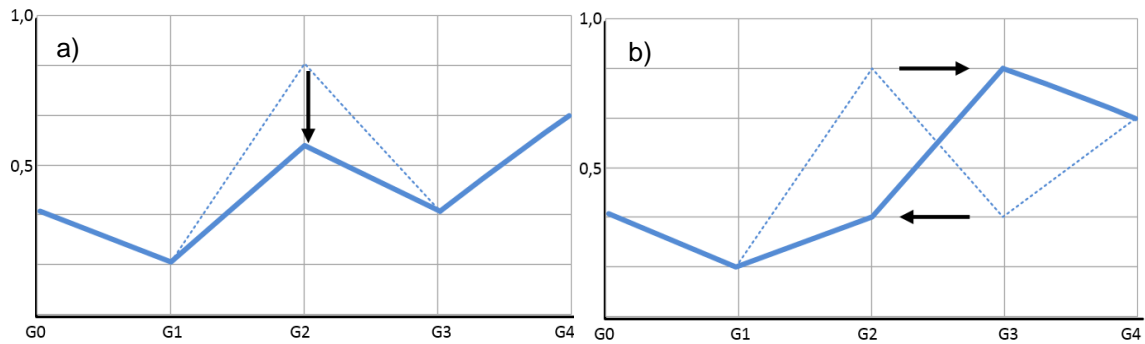


Figura 3.28 - Gráfico Genómico: a) Mutação de Pontos; b) Inversão de Pontos (Rutten, D., 2010).

3.4.4. ALGORITMO DE ARREFECIMENTO SIMULADO

O algoritmo de arrefecimento simulado (*simulated annealing*) é comumente aceite como a mais antiga das técnicas meta-heurísticas que aplica uma estratégia explícita para evitar ótimos locais (Blum, C. e Roli, A., 2003). O algoritmo foi pela primeira vez aplicado na lógica da CE por Kirkpatrick em 1983 (Kirkpatrick, S. e Vecchi, M., 1983). O arrefecimento simulado, como já referido, aplica a teoria da termodinâmica na pesquisa de soluções. Mais especificamente, o processo de cristalização que ocorre quando um metal derretido é arrefecido. Quando a entropia do sistema começa a baixar, os átomos começam a ligar-se formando pequenos cristais. À medida que a temperatura desce, o tamanho destes cristais aumenta. Este processo pode ser descrito por uma série de equações matemáticas, que por sua vez podem ser empregues na pesquisa de picos dentro do terreno *fitness*. O *solver*, ao aplicar este algoritmo, vai progredir executando saltos aleatórios dentro do terreno em cada etapa de decrescimento da temperatura. Caso o *solver* não aceite a nova solução, porque é pior que a anterior, então reverterá à posição anterior. Na figura 3.29 apresenta-se o esquema de iteração deste algoritmo. À medida que o processo decorre, os saltos vão sendo cada vez menores, até que chegará (eventualmente) a um ponto em que o algoritmo será muito exigente em aceitar novos estados do sistema. Este será o caso em que as soluções se localizam nos picos do terreno *fitness*, e por isso, muito próximas dos ótimos. O processo pode-se subdividir em duas partes: primeiro o *solver* tenta encontrar zonas de terreno promissor, isto é, terreno alto; seguidamente tenta refinar a sua posição de modo a encontrar o ponto mais alto desse pico (Rutten, D., 2013). Em (Portella, F., 2014) mostra-se uma animação simples de ilustração que permite compreender melhor o funcionamento do algoritmo de arrefecimento simulado. O objetivo é encontrar o pico mais alto no gráfico. É fácil verificar que, à medida que a temperatura desce, os saltos no gráfico vão sendo cada vez mais pequenos e aproximam-se do máximo global. Na figura 3.30 mostra-se uma imagem da situação final, com temperatura zero, em que o algoritmo encontrou o pico mais alto (máximo global), de entre os vários picos (máximos locais) do terreno *fitness*.

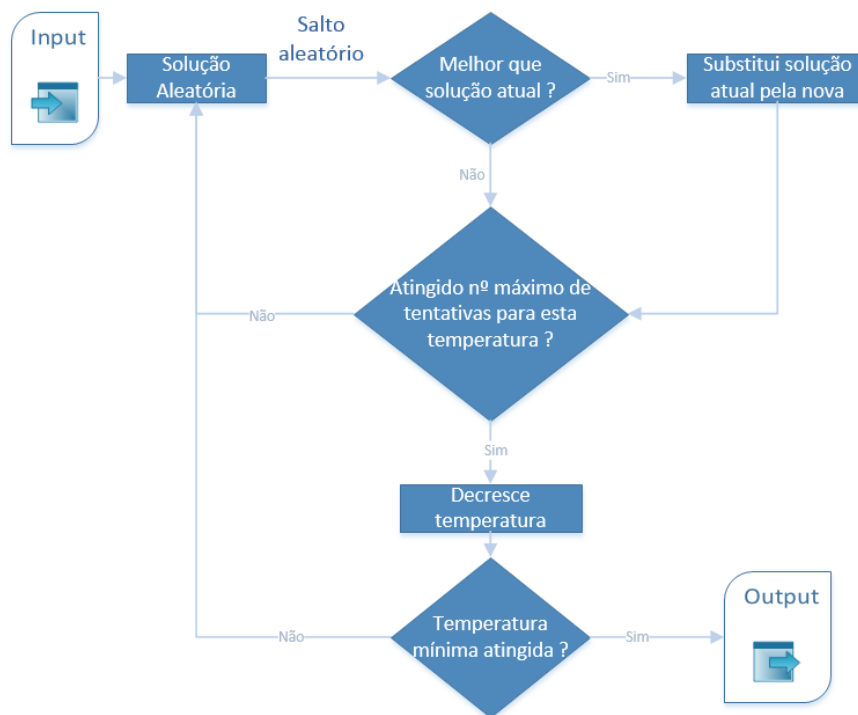


Figura 3.29 – Esquema do *loop* básico do algoritmo de arrefecimento simulado (Heaton, J., 2014).

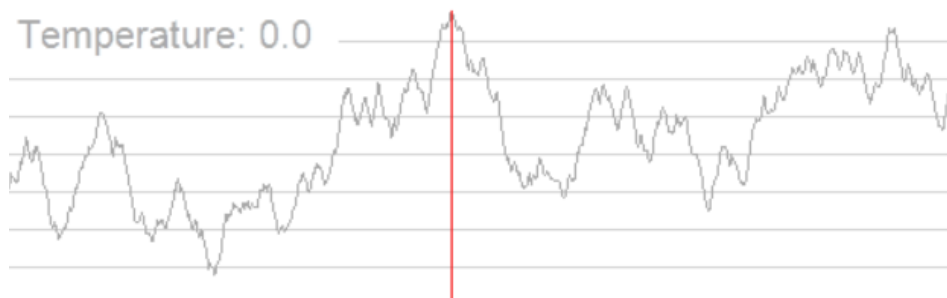


Figura 3.30 - Algoritmo de arrefecimento simulado num problema de busca do máximo global (Portella, F., 2014).

3.4.5. ALGORITMOS EVOLUCIONÁRIOS MULTI-OBJETIVO

Quotidianamente, os problemas com que os profissionais da AEC se confrontam envolvem a simultânea consideração de múltiplos objetivos de desempenho. Geralmente, estes objetivos não são comensuráveis e frequentemente entram em conflito entre si. Nestas situações não existe uma solução única que otimize o problema. Ao invés, existe um conjunto de soluções de compromisso entre os vários objetivos envolvidos, onde avanços num objetivo causam a deterioração noutra (*trade-off*). Desta forma, não existe uma solução única, existirá sim uma família de soluções que revelam as melhores relações de compromisso para o problema. A estas soluções chamam-se ótimos de Pareto, porque não existem nenhuma outras soluções que permitam melhorar um determinado objetivo sem deteriorar um ou mais dos outros objetivos. Na figura 3.31 ilustra-se o conceito de ótimo de Pareto para uma situação de dois objetivos, ambos a minimizar. A região acima da linha verde é a região das soluções possíveis para o problema. A linha marcada a verde é a fronteira de Pareto, limite das soluções possíveis, onde residem as soluções de compromisso, ou seja aquelas que melhor otimizam os vários objetivos simultaneamente (Fleming, P.J. e Purshouse, R.C., 2002).

Atualmente, os problemas multi-objetivo são adereçados na prática como problemas de objetivo único, através da construção de uma função que permite descrever a importância relativa de cada objetivo. Exemplo disto é a análise multicritério de propostas em projetos de construção. Nestes, a função objetivo é definida antes do processo de análise, requerendo por isso grande informação *à priori* relativamente à relação e peso adequado a atribuir a cada objetivo, no contexto do problema. No entanto, muitas vezes esta informação é desconhecida ou difícil de definir à partida, obrigando a um processo de tentativa e erro até chegar a uma solução satisfatória. Além disto, cada iteração no processo retorna apenas uma única solução (Fleming, P.J. e Purshouse, R.C., 2002).

É neste contexto que os AEMO se revelam úteis, uma vez que conseguem lidar com vários objetivos simultaneamente, e devido à sua base nos AE, permitem com poucos dados iniciais obter um espectro de soluções que otimizam os vários objetivos simultaneamente. Desta forma, é fácil visualizar as várias soluções de compromisso possíveis, e assim julgar e decidir acerca da melhor relação e peso de cada objetivo no problema.

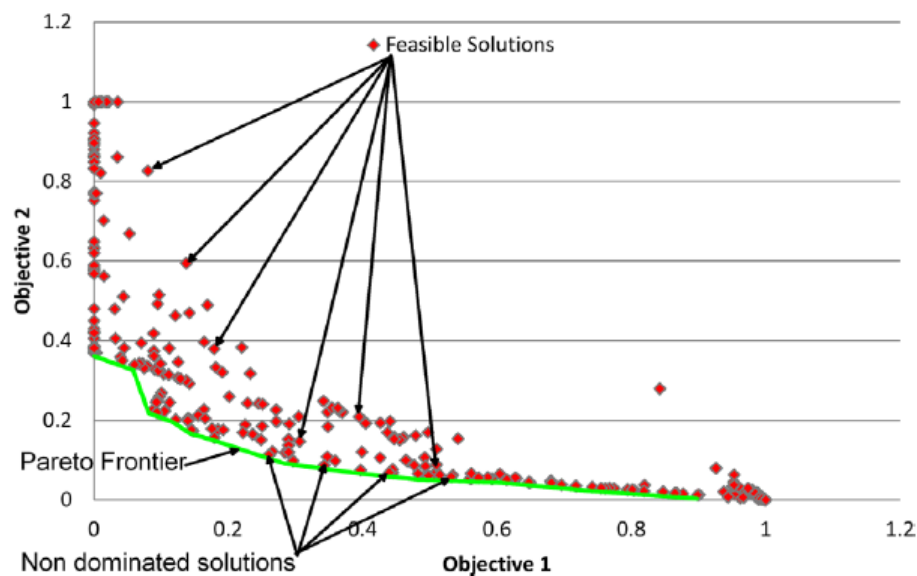


Figura 3.31 - Exemplo de fronteira de Pareto numa análise multi-objetivo (Machairas, V. [et al.], 2014).

No contexto da ferramenta Grasshopper, recentemente surgiu um *plug-in* de aplicação dos AEMO, o Octopus (Grasshopper3d, 2013). O Octopus introduz a capacidade de lidar com múltiplos valores *fitness* no processo de otimização, procurando as melhores relações de compromisso entre eles, apresentando-os sob a forma de uma fronteira de Pareto. Dentro dos AEMO, o Octopus utiliza o algoritmo SPEA-2 (*Improved Strength Pareto Evolutionary Algorithm*), que é detalhadamente desenvolvido em (Zitzler, E. [et al.], 2001).

4

PROJETO ORIENTADO PELO DESEMPENHO

4.1. ENQUADRAMENTO GERAL

Já foi discutido anteriormente que os avanços na modelação e análise computacional permitem que engenheiros e arquitetos simulem o desempenho dos seus edifícios em ambiente virtual. Entre os critérios de desempenho passíveis de analisar num protótipo digital, atualmente, incluem-se aspetos arquitetónicos, estruturais, ambientais (por exemplo, consumo energético), acústicos, ou climáticos (por exemplo, insolação), com uma lista que se expande cada vez mais a novos domínios (Fischer, M., 2006). Muitos destes aspetos são tipicamente determinados por decisões tomadas nas etapas preliminares da fase de projeto, tendo um impacto significativo no restante processo de projeto e consequentemente em todo o ciclo de vida do edifício.

Atualmente, o potencial oferecido por estas ferramentas para informar acerca do desempenho dos edifícios, logo na fase concetual do projeto, não se encontra completamente realizado. Isto porque as ferramentas e processos, convencionalmente utilizados na AEC, não suportam ainda a rápida geração e avaliação de alternativas (Flager, F. e Haymaker, J., 2007).

Em qualquer projeto, a equipa tem de começar por se abstrair e considerar possíveis soluções para o problema. Nesta fase, a incerteza acompanha o projetista, à qual se alia a complexidade de conhecimentos a compatibilizar e de requisitos a cumprir. Sob estas circunstâncias, as opções tomadas nas fases embrionárias de projeto podem depender muito de características pessoais dos membros da equipa de projeto. Fatores como a experiência, intuição, personalidade, capacidades cognitivas e percetivas influenciam as opções tomadas. Estas decisões irão afetar o projeto final, resultando em soluções, à partida, satisfatórias, mas não insuperáveis (Saridakis, K.M. e Dentsoras, A.J., 2006).

O tempo que é necessário despende para gerar e avaliar uma única solução de projeto é frequentemente elevado, pelo que a lista de soluções que podem ser adequadamente estudadas ao longo do processo é muito limitada – por vezes reduzida a uma única solução. Muitas vezes, os engenheiros servem-se dos modelos digitais para validar apenas uma determinada solução, ao invés de explorarem múltiplas alternativas. A inabilidade para rapidamente gerar, analisar e avaliar múltiplas opções de forma rigorosa, numa perspetiva multidisciplinar, invariavelmente, deixa uma ampla área no espectro de soluções possíveis por explorar (Flager, F. e Haymaker, J., 2007). Potencialmente, esta área inexplorada contém soluções com melhor desempenho do que aquela que foi escolhida, originando soluções pouco otimizadas (Shea, K. [et al.], 2005).

Flager e Haymaker fazem um paralelo entre o paradigma atual de projeto na AEC e o da indústria aeroespacial, cujos desafios se assemelham. Os rigorosos critérios de desempenho exigidos aos

componentes aeronáuticos impuseram o desenvolvimento de novas metodologias de modelação e projeto. Neste contexto, a indústria aeroespacial, começou a aplicar metodologias como a modelação paramétrica, análise de desempenho automatizada por disciplina, e técnicas multidisciplinares de otimização (Flager, F. e Haymaker, J., 2007).

No subcapítulo 2.2, foi abordado o tema da modelação paramétrica como potenciadora de processos gerativos de projeto. A evolução do projeto de estado único, para um projeto dinâmico parametrizado facilita a integração de processos gerativos que se adaptam e geram soluções em função de objetivos pré-definidos. Deste modo é possível obter *feedbacks* expeditos e bem fundamentados acerca de diversas alternativas de projeto, posicionando-se como um suporte valioso à avaliação e tomada de decisão por parte do projetista.

Como também já discutido anteriormente, o advento das capacidades paramétricas das ferramentas de modelação no seio da AEC, tornou possível um novo entendimento estético na arquitetura contemporânea, com a incorporação das *free-forms*. No entanto, um projeto não deve ser entendido apenas como um processo criativo, mas principalmente como um ato racional, que responda tão bem aos princípios Vitruvianos de *firmitas* (solidez) e *utilitas* (utilidade) como ao de *venustas* (beleza) (Dino, Í.G., 2012).

Neste contexto urge complementar os processos gerativos com análises de desempenho que permitam gerar modelos fundamentados em critérios de desempenho do edifício. É neste contexto que surge o Projeto Orientado pelo Desempenho (POD), apelidado por Kalay de *Performance-based Design* (Kalay, Y.E., 1999). No mesmo contexto, outros autores referem-se a esta metodologia como *Performance oriented Design* (Turrin, M. [et al.], 2011), *Performance-driven Design* (Shea, K. [et al.], 2005) ou ainda *Performative Design* (Oxman, R., 2009).

Na prática corrente da AEC, a geração do modelo toma prioridade sobre a análise de desempenho, sendo esta última relegada para uma fase posterior. Deste modo a geração do modelo tem em conta apenas critérios geométricos e estéticos, estando o desempenho negligenciado na fase de formação da maquete digital.

O POD, em contraste, pretende incorporar a componente analítica no processo de geração do modelo, contribuindo assim para um modelo digital integrado, potenciando capacidades de prototipagem digital. Em vez de simular e analisar o desempenho da maquete digital numa lógica pós-racionalista, seguida pelas modificações necessárias, a informação fornecida pelas análises de desempenho pode diretamente modificar o modelo. Assim, nesta abordagem, o desempenho pode ser ativado como o principal mecanismo guiador da geração e modificação dos modelos digitais (Oxman, R., 2009).

Na modelação paramétrica, as relações entre entidades do modelo são explicitamente descritas. As interdependências entre as entidades são claramente estabelecidas e definidas de forma coerente. Desta forma, qualquer variação ao modelo pode facilmente ser concretizada, através da manipulação dos parâmetros pré-estabelecidos. Assim, um modelo parametrizado revela-se como a base para a implementação de processos gerativos e, conseqüentemente, do POD. Neste, a formação geométrica do modelo é considerada como resultado de um processo gerativo orientado por aspetos de desempenho (Oxman, R. e Oxman, R., 2010).

Embora, a integração de aspetos de desempenho na geração geométrica de maquetes digitais seja ainda uma abordagem pouco utilizada dentro do setor, também é verdade que existem já algumas obras proeminentes cujos princípios de projeto incorporaram alguns dos conceitos explorados neste trabalho. No subcapítulo 4.3 são apresentados alguns projetos relevantes neste domínio.

4.2. FRAMEWORK DE APLICAÇÃO DO PROJETO ORIENTADO PELO DESEMPENHO

“Convencionalmente o projeto é visto como um processo de ciclos repetitivos de geração/avaliação/modificação até que se atinja a convergência, através da satisfação dos objetivos do projeto.” (Oxman, R. [et al.], 2007).

Atualmente, nas ferramentas mais convencionais como o CAD, a modelação tende a seguir este padrão sequencial. Em primeiro lugar é gerada a geometria, a qual é depois transportada para diferentes ferramentas de simulação que irão analisar o desempenho de uma solução única. Após a avaliação de desempenho e, baseando-se nos resultados obtidos, o projetista pode finalmente proceder às alterações de modo a convergir para os objetivos definidos. Este ciclo repete-se, até que, uma solução satisfaça os objetivos. Nesta abordagem, cada ciclo implica um grande esforço do projetista com trabalhos, repetitivos e morosos, de alterações, que pouco acrescentam à cadeia de valor.

Na abordagem POD, ao incorporar processos gerativos integrados com ferramentas de análise de desempenho, torna possível que os *feedbacks* analíticos e de otimização forneçam resultados que, automaticamente, modifiquem o modelo. Assim, aspetos como a análise estrutural, climática, acústica ou de sustentabilidade podem ser formulados como condições ou objetivos a otimizar. Desta forma os *feedbacks* de desempenho vão guiar o processo de geração e modificação do modelo digital, permitindo uma avaliação mais informada por parte do projetista. Em suma, este processo fomenta a rápida criação e análise de alternativas, contribuindo para edifícios mais otimizados e orientados para o desempenho (Oxman, R. [et al.], 2007).

No contexto do POD, o desempenho é traduzido em parâmetros (implícitos ou explícitos) dentro do modelo paramétrico, que têm a capacidade de modificar a geometria do modelo. De modo a que isto seja possível, é necessário que o modelo paramétrico seja estrategicamente construído para que os processos gerativos sejam compatibilizados com os objetivos de desempenho definidos. Os critérios de desempenho podem resultar de ferramentas externas de análise, como as ferramentas FEM, técnicas de otimização como as discutidas no capítulo 3 ou de simples manipulação paramétrica.

Na figura 4.1 propõe-se um *framework* que pretende ilustrar conceptualmente o POD como metodologia integrada de projeto. Este *framework* é constituído pelas três fases cíclicas de geração/avaliação/modificação, sobre os quais se aplicam os conceitos explorados neste trabalho. Após a seleção da solução definitiva - de entre as várias soluções satisfatórias geradas - procede-se à integração do modelo em ambiente BIM, de forma a gerar e centralizar toda a informação de projeto necessária à sua correta execução e fabricação, como previamente discutido em 2.4.

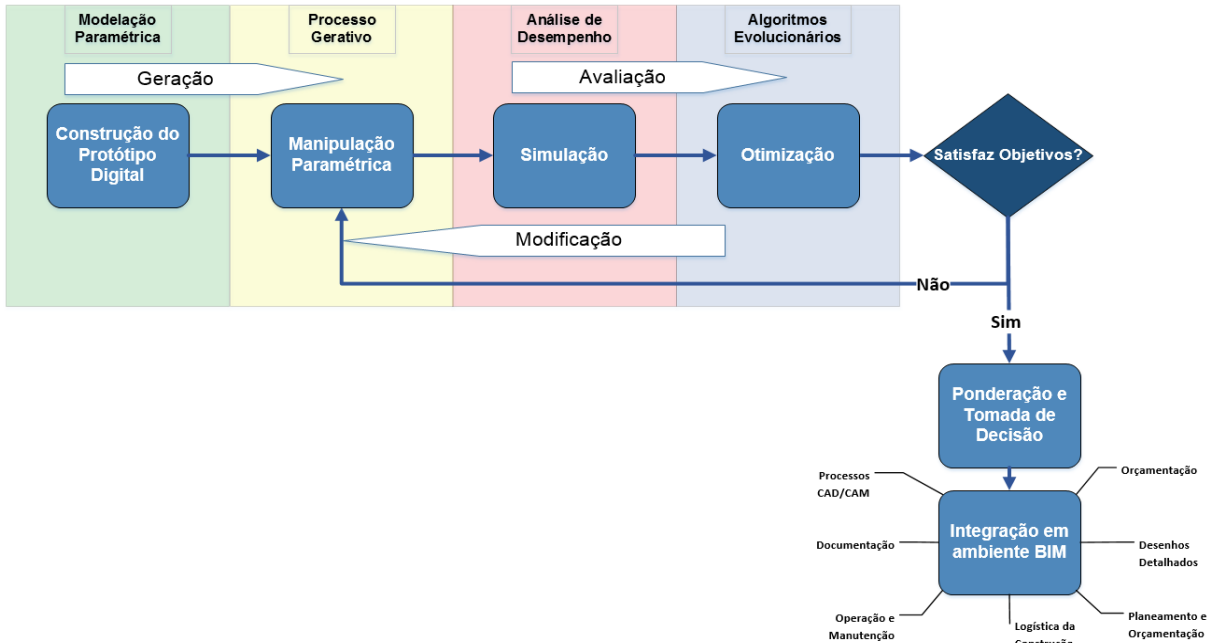


Figura 4.1 - Framework de aplicação do projeto orientado pelo desempenho.

4.3. OBRAS PROEMINENTES NO DOMÍNIO DO PROJETO ORIENTADO PELO DESEMPENHO

4.3.1. GREATER LONDON AUTHORITY HEADQUARTERS

Localização: Londres, Reino Unido

Arquitetura: Foster + Partners

Engenharia Estrutural: Arup

Ano de Conclusão: 2002

Este edifício, que serve de sede à câmara municipal de Londres e respetiva assembleia, introduziu na sua conceção um dos pontos principais do POD, a avaliação de desempenho multidisciplinar. Inicialmente a sua conceção foi puramente formal do ponto de vista arquitetónico, evoluindo, ao longo do seu desenvolvimento, de forma a acomodar uma lógica de desempenho ambiental. A sua geometria e orientação final resultaram de um processo de otimização do desempenho energético, procurando maximizar a superfície exposta à luz solar direta e a ventilação de modo a reduzir o consumo energético. A forma do edifício, que se assemelha a uma esfera deformada, permitiu que a superfície total fosse reduzida em 25%, quando comparada com a superfície de um cubo de volume idêntico, resultando em trocas de calor, através da fachada, otimizadas. Ainda ao nível da simulação e análise de desempenho energético, o edifício retira também partido da sua posição junto ao rio Tamisa como forma de ventilação através de sistema passivos que permitem a admissão de ar, também estes estudados computacionalmente, assim como o posicionamento estratégico das aberturas na fachada (Kolarevic, B., 2003a, Oxman, R., 2009).

Esta obra é um exemplo da aplicação de análises de desempenho em conjunto com processos de otimização, que se propõe também no POD. A superfície curvilínea da fachada foi modificada com base nas análises de desempenho, levadas a cabo por *softwares* específicos para cada domínio avaliado, sendo a solução final resultado de uma relação de compromisso entre os vários objetivos de desempenho considerados. Assim a forma final foi resultado de modificações feitas com base em requisitos objetivos de desempenho, ao invés da forma complexa ser predeterminada e, por isso, ser o ponto de partida sobre

o qual, posteriormente se procederia à avaliação de desempenho (Kolarevic, B., 2003a). Esta obra é um claro exemplo de que as *free-forms* podem ser, não só uma expressão estética, mas também uma expressão formal da consciência de sustentabilidade, conseguida através da simulação, otimização e avaliação de desempenho multidisciplinar.



Figura 4.2 - Greater London Authority Headquarters, Londres, Reino Unido, 2002 (Gonzalez, A., 2011).

4.3.2. COBERTURA DA ESTAÇÃO DE METRO DA PRAÇA GARIBALDI

Localização: Nápoles, Itália

Arquitetura: Dominique Perrault

Engenharia Estrutural: Bollinger + Grohmann e Fabien Scheurer

Ano de Conclusão: 2013

Com 300 m de comprimento e 20 m de largura, a cobertura da estação de metro Garibaldi é composta por uma série de 8 “árvores” metálicas distintas, criando uma vasta superfície prismática fazendo lembrar um aglomerado de galhos flexíveis de bambu acidentalmente organizados (Architecture, D.P., 2004).

Os métodos computacionais permitiram gerar e avaliar um grande número de possíveis soluções estruturais. Através de técnicas de otimização, em conjunto com ferramentas de análise FEM, foi possível evoluir populações de estruturas de onde foram selecionados os indivíduos com o melhor *fitness* (Bollinger, K. [et al.], 2008).

Através da aplicação de técnicas de otimização, nomeadamente os AG, foi possível conduzir estudos para melhorar o desempenho estrutural da cobertura. A estrutura é composta por perfis tubulares que se desenvolvem de forma semelhante aos galhos de uma árvore até que se reúnem num tronco principal que atua como estrutura de suporte. De modo a simular a estrutura em consola, recorreu-se a um *software* FEM. Como critérios *fitness* de minimização foram utilizados os deslocamentos nodais e o peso próprio, obtidos da análise de desempenho FEM, e que, conseqüentemente, permitiram classificar cada geração segundo o seu *fitness* através das técnicas de otimização. A estrutura viu o seu desempenho global incrementado significativamente após 200 gerações de 40 indivíduos cada (Bollinger, K. [et al.], 2008).

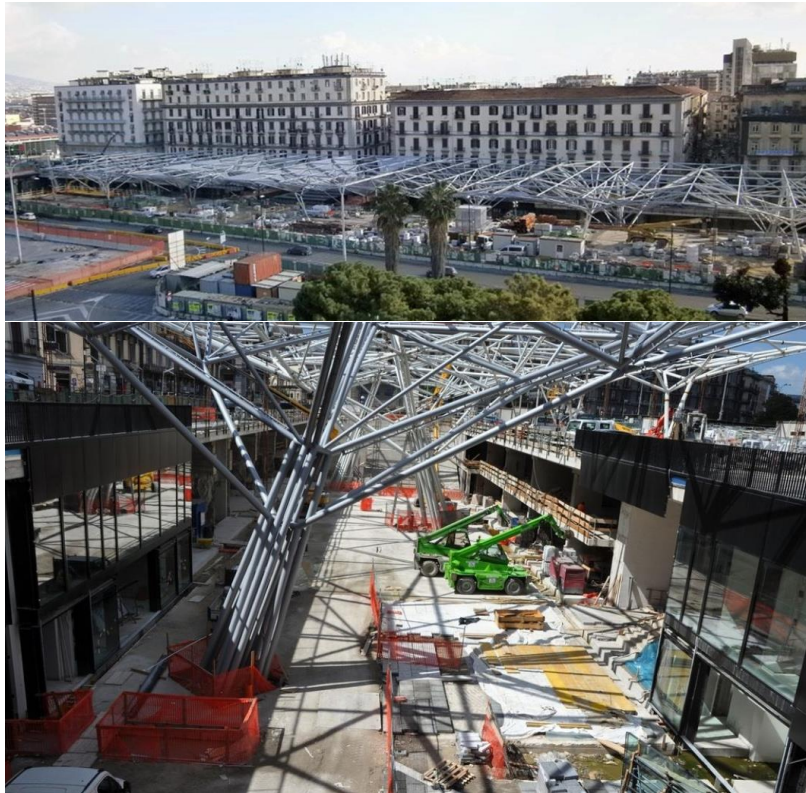


Figura 4.3 - Cobertura da Estação de Metro da Praça Garibaldi, Nápoles, Itália, 2015 (Grohmann, B., 2014).

Esta obra demonstra as primeiras quatro fases do *framework* POD. Numa primeira fase, o modelo foi parametrizado de forma a acomodar os objetivos estruturais e arquitetónicos definidos. De seguida, através da manipulação paramétrica, foram sendo gerados indivíduos – isto é, geradas diferentes combinações paramétricas ou genéticas - os quais foram sendo analisados com recurso a um *software* FEM. Dos indivíduos criados, foram selecionados os que possuíam melhor *fitness* para gerar descendência, e, com isto, alimentar o processo evolutivo até chegar um conjunto de soluções finais otimizadas. Após o processo integrado de modelação, análise e otimização, foi então possível selecionar uma que, no entender da equipa de projeto, seria a que melhor se encaixava nos propósitos do projeto.

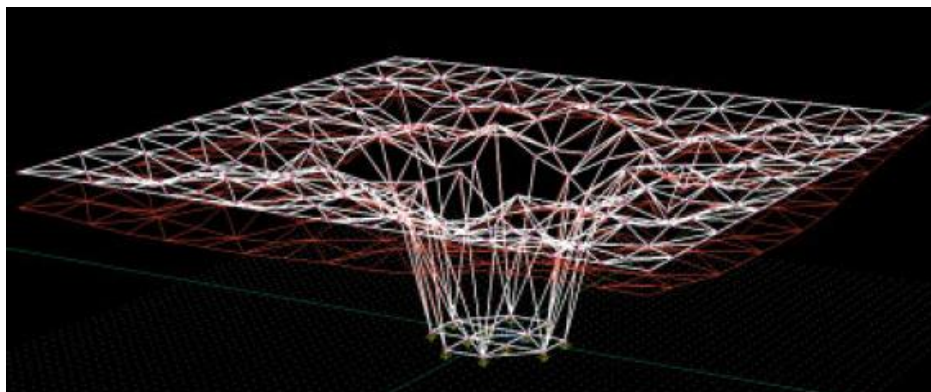


Figura 4.4 - Análise de desempenho de um indivíduo específico em *software* FEM (Bollinger, K. [et al.], 2008).

4.3.3. AEROPORTO INTERNACIONAL BAO'AN

Localização: Shenzhen, China

Arquitetura: Massimiliano Fuksas

Engenharia Estrutural: Knippers Helbig Advanced Engineering

Ano de Conclusão: 2013

Nesta obra, o conceito arquitetónico mostra uma estrutura espacial, totalmente coberta por uma fachada perfurada de 300.000 m², constituída por folhas metálicas em favo de mel. No total, a fachada constitui-se por cerca de 60.000 elementos de fachada diferentes e 400.000 peças metálicas individuais (Scheible, F., 2011). Enquanto que o sistema estrutural não traz grandes dificuldades, a fachada demonstra grande complexidade. Para contornar o problema, cada folha metálica foi mapeada numa superfície paramétrica. No entanto, numa superfície de dupla curvatura, são necessárias modificações adicionais de modo a levar em consideração os painos de vidro, que devem permanecer planos, como condição fronteira para as dimensões e abertura das folhas metálicas. O tamanho e o declive das aberturas de vidro foram usados como parâmetros de projeto, de modo a atingir os objetivos de projeto no que concerne à iluminação natural, ganhos solares, visibilidade a partir do interior e intenções estéticas. O modelo paramétrico foi então montado de forma limitar o número de elementos metálicos diferentes e ainda assim cumprir os requisitos de desempenho. Após isto, o modelo foi sendo sucessivamente gerado e avaliado, permitindo ajustes, tanto à forma do edifício, como aos elementos metálicos. Desta forma, foi possível obter uma sequência de painéis bastante mais simples, e que, ainda assim cumpre os objetivos estéticos e de desempenho. No final, a solução construída continha apenas 20 painéis diferentes, tal como ilustrado de forma esquemática na figura 4.6 (Helbig, T. [et al.], 2014, Knippers, J., 2013).

A solução final foi conseguida através da parametrização da superfície da fachada e dos painéis metálicos com recurso a um *software* de modelação paramétrica em conjunto com uma folha de cálculo para mapear cada painel, como ilustrado na figura 4.7.

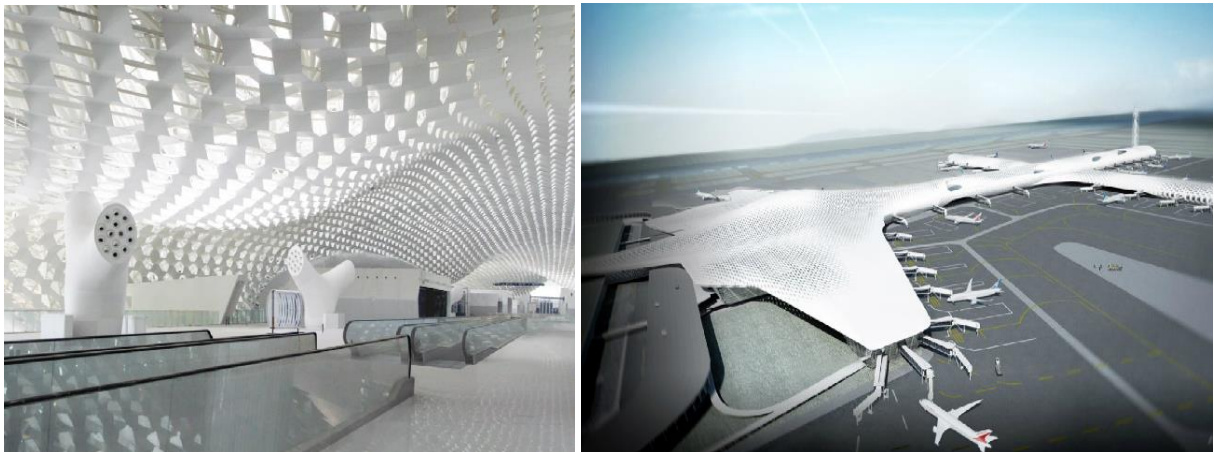


Figura 4.5 - Aeroporto Internacional Bao'an, Shenzhen, China, 2011, M. Fuksas; (Studio, F., 2009).

4.4. CASO PRÁTICO DE APLICAÇÃO

Neste subcapítulo pretende-se elucidar o *framework* de aplicação do POD, exemplificando-o com um caso de prático. Este, constitui-se por um *mezzanine* retangular com 25 m², apoiado nos seus vértices, e composto por um reticulado ortogonal em estrutura metálica. O objetivo do problema é otimizar parâmetros relacionados com o seu desempenho estrutural, apresentados mais abaixo.

Para este caso prático foi utilizado o Rhinoceros em conjunto com o Grasshopper. Para a parametrização da estrutura, foi criado um parâmetro que relaciona o seu comprimento e largura, de tal forma que a área seja sempre constante, de 25 m². Para efeitos deste problema, considera-se que a largura é medida ao longo do eixo X e o comprimento ao longo do eixo Y e que a dimensão mínima do *mezzanine* considerada foi de 2,5 m, de modo a não surgirem soluções demasiado desproporcionais, como 25 x 1 [m]. O caso prático foi dividido em dois problemas. Um primeiro de otimização da flecha máxima, cuja solução é conhecida à partida, visto que será a solução quadrangular a minimizante. E um segundo caso de otimização multi-objetivo da flecha e massa, que é um caso mais complexo e sem solução única. Cada um destes problemas é devidamente formulado e explicado abaixo.

Na figura 4.9 representam-se duas configurações possíveis para o *mezzanine* com malha retangular ortogonal espaçada de 1 m nas duas direções.

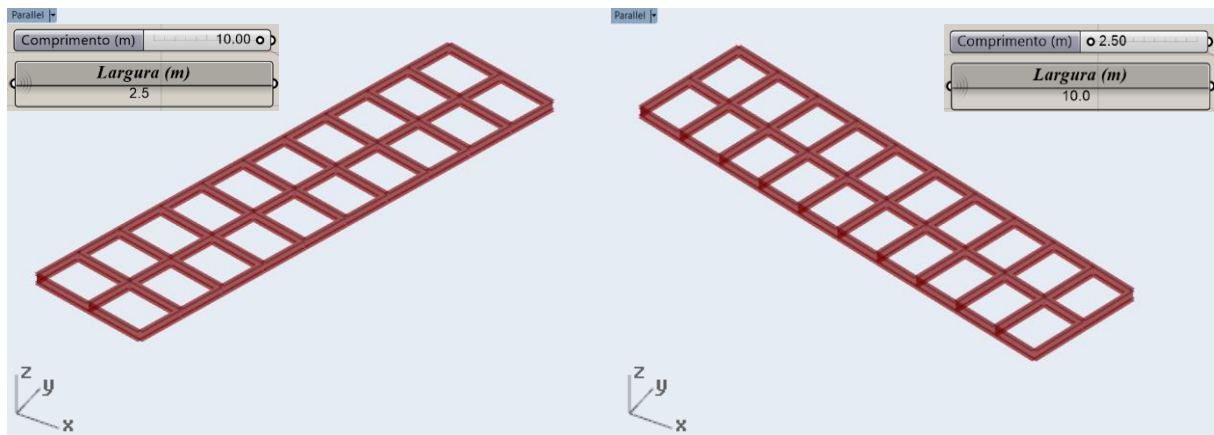


Figura 4.9 - Duas configurações possíveis para o *mezzanine*.

4.4.1. PROBLEMA 1 – OTIMIZAÇÃO DA FLECHA

Formulação do problema

- Área constante de 25 m²;
- *Mezzanine* retangular apoiado nos seus vértices;
- Parâmetros: Comprimento (m)
Intervalo de variação: 2.5 – 10 [m];
- Restrições: $Largura = \text{Área}/\text{Comprimento}$;
- Malha ortogonal em estrutura metálica espaçada de 1 m em ambas as direções;

Na figura 4.10 representa-se a definição Grasshopper para a parametrização do *mezzanine*, que define as coordenadas cartesianas dos seus apoios, e que, por sua vez, definem o retângulo base e a malha ortogonal.

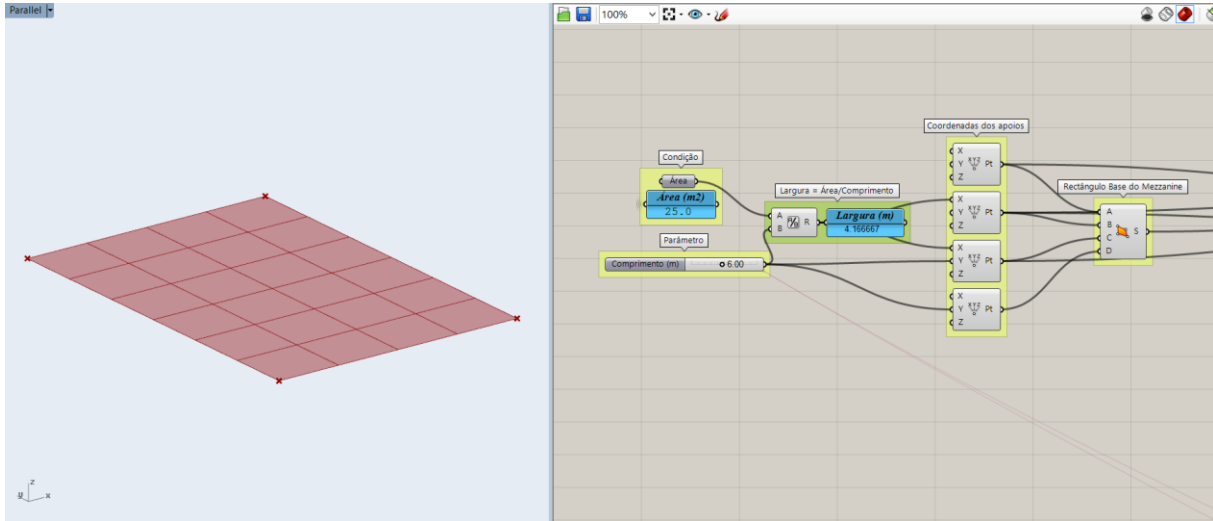


Figura 4.10 - Construção paramétrica do modelo.

Após a construção paramétrica do modelo, foi utilizado o *plug-in* Karamba para a análise estrutural. Na figura 4.11 representa-se a tradução dos elementos Grasshopper em elementos Karamba. Para esta análise foram definidas, adicionalmente, as seguintes condições:

- Material: Aço S235;
- Secção dos perfis metálicos: IPE200;
- Ações consideradas: 10 kN/m² e peso próprio;

A partir da análise do Karamba é possível obter vários valores de classificação do desempenho estrutural do *mezzanine*. Existem também várias formas de visualização da estrutura analisada. Na figura 4.12 mostra o exemplo de uma estrutura analisada com 6 x 4.17 [m].

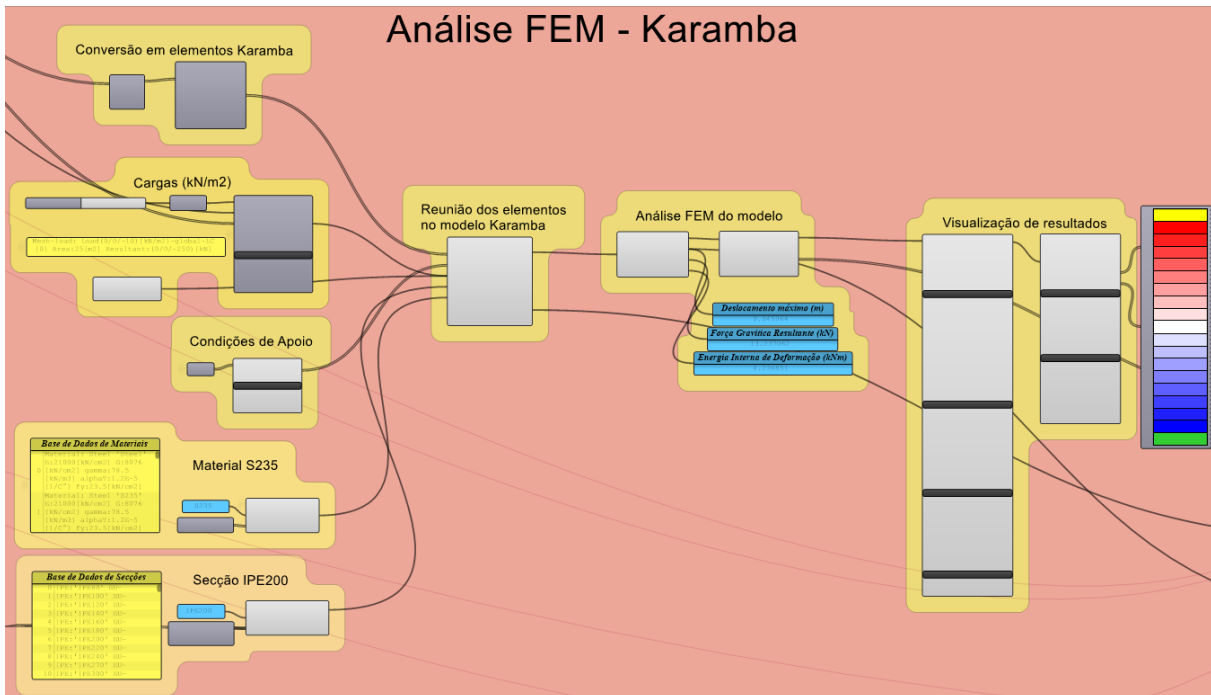


Figura 4.11 - Montagem do modelo Karamba para análise estrutural.

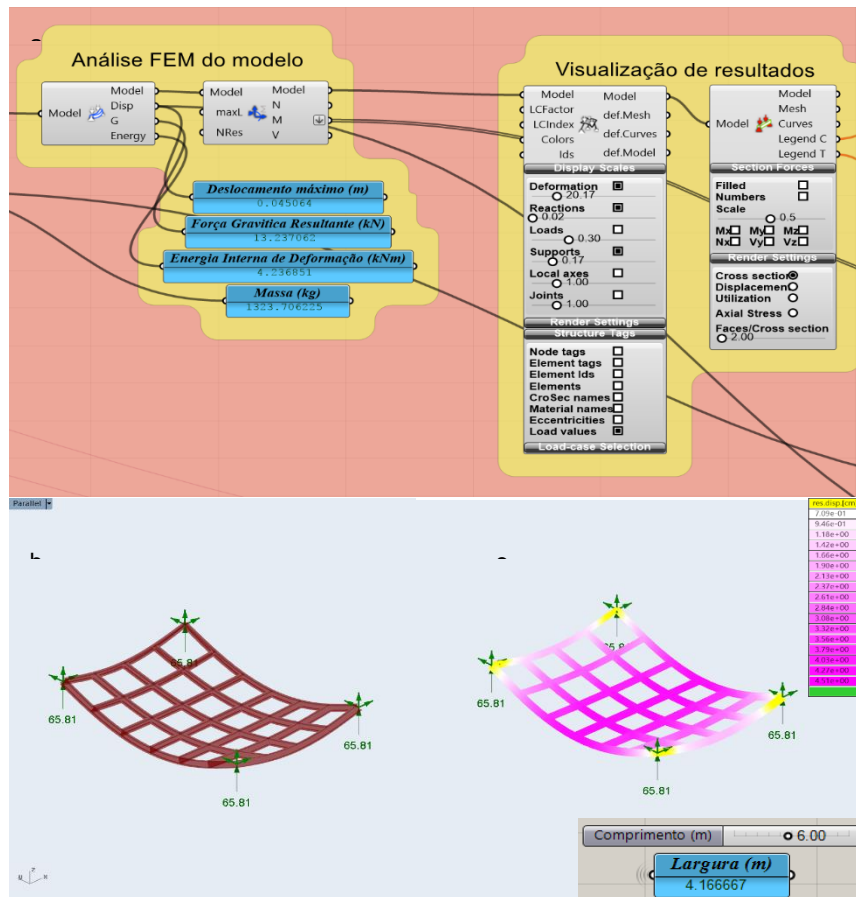


Figura 4.12 - Mezzanine de 6 x 4.17 [m]. a) Análise do modelo no Karamba e opções de visualização do modelo; b) Visualização do modelo deformado – escala de deformação 20x; c) Visualização dos deslocamentos das secções em gradação de cores – escala de deformação 20x.

A partir desta construção paramétrica e dos resultados obtidos através do Karamba, é possível utilizar o *evolutionary solver* Galapagos para otimização da flecha máxima. Utilizando como gene o *slider* do comprimento e como função *fitness* a minimização do deslocamento máximo, foi possível obter a configuração do *mezzanine* que otimiza a flecha máxima da estrutura. Na figura 4.13 ilustra-se a definição desta situação. Na figura 4.14 ilustram-se as condições iniciais escolhidas para correr o *evolutionary solver* Galapagos.



Figura 4.13 - Otimização estrutural com Galapagos: Gene – Comprimento (m), Função *fitness* – Deslocamento máximo (m).

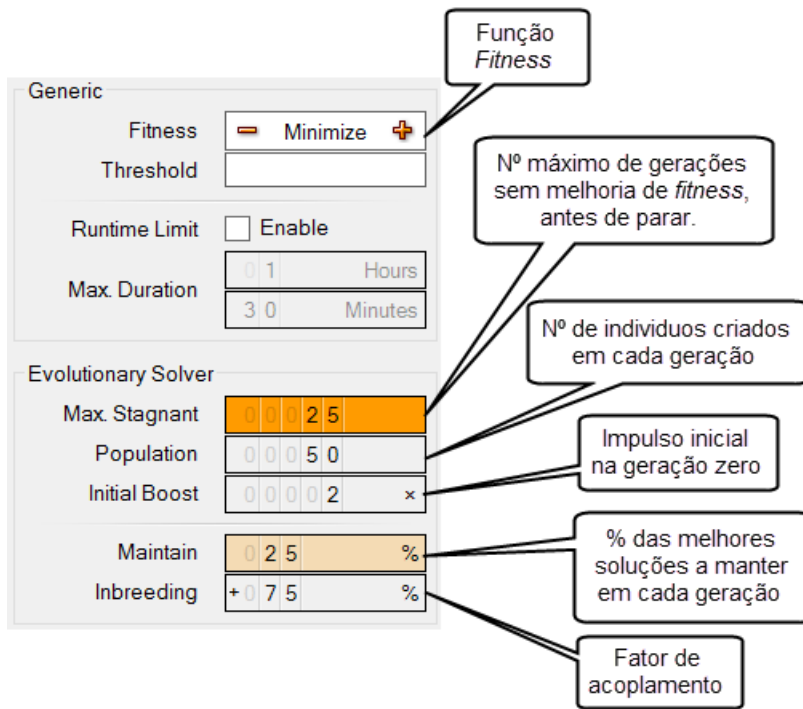


Figura 4.14 - Condições iniciais prescritas para o algoritmo genético do Galapagos.

Após correr o Galapagos, foi possível obter como resultado ótimo um comprimento de 5 m, que corresponde à configuração quadrangular. Como seria de esperar, esta é a solução que conduz ao mínimo deslocamento. Como se ilustra na figura 4.15 o deslocamento para a solução ótima é de 35.001 mm. Nesta figura, ilustra-se também o interface Galapagos com os resultados, onde é possível verificar pelo gráfico da função *fitness*, que o algoritmo genético convergiu rapidamente, necessitando de apenas duas gerações para encontrar o ótimo.

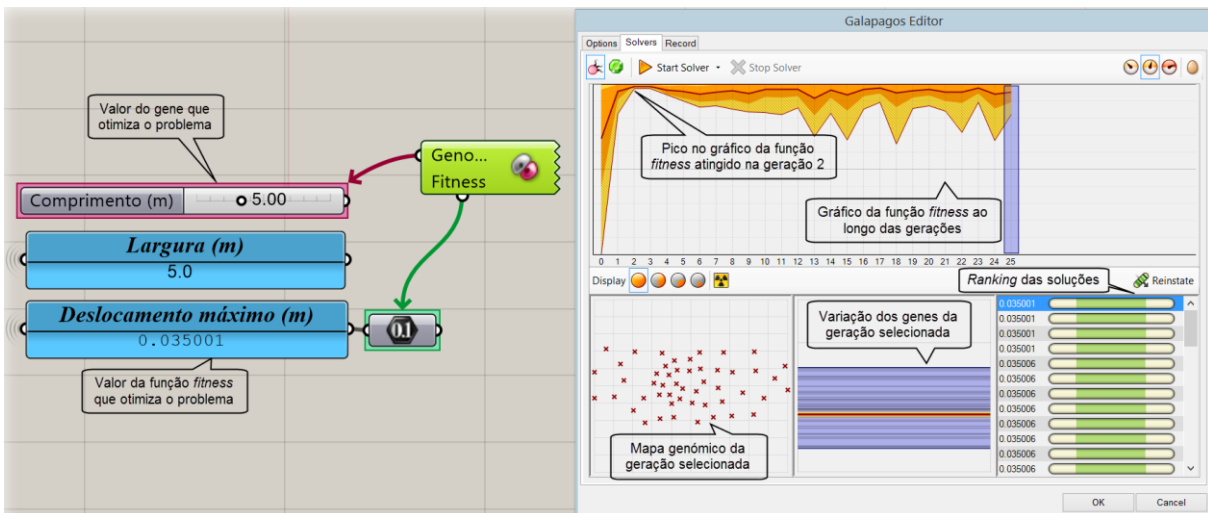


Figura 4.15 - Resultados obtidos após otimização com o Galapagos.

Na figura 4.16 e 4.17 ilustra-se a solução que otimiza o problema tratado, bem como os seus valores de desempenho estrutural calculados pelo Karamba.

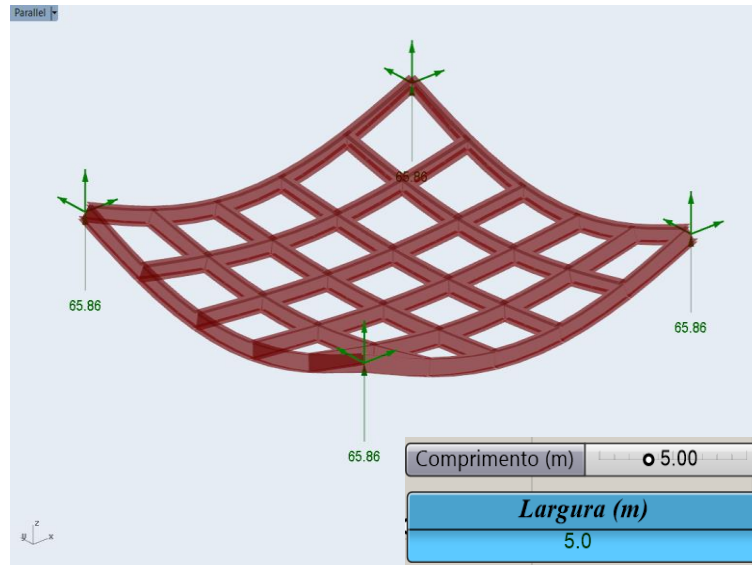


Figura 4.16 - Solução ótima: 5 x 5 [m].

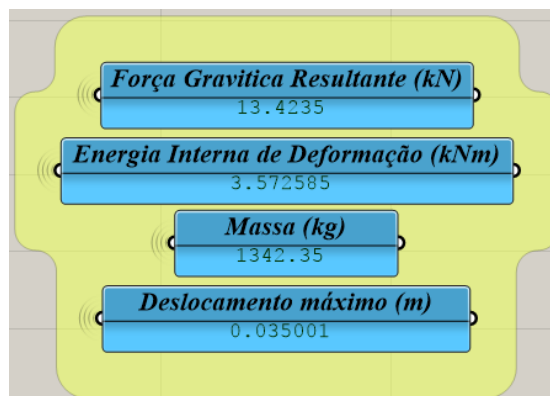


Figura 4.17 - Valores de desempenho estrutural da solução ótima retirados do Karamba.

Assim, após obter os resultados da otimização do problema, e dada a simplicidade deste exemplo, é fácil aceitar, como a melhor solução, aquela que a ferramenta de otimização devolveu. De forma a completar o *framework* *POD*, ilustra-se na figura 4.18 a definição que permite exportar a solução formulada para ambiente BIM, através do formato IFC. Para isto, utilizou-se o *plug-in* *GeometryGym* que permite a interoperabilidade entre o *Grasshopper* e algumas ferramentas BIM, tendo sido utilizado para este caso o *software* BIM *Autodesk Revit*.

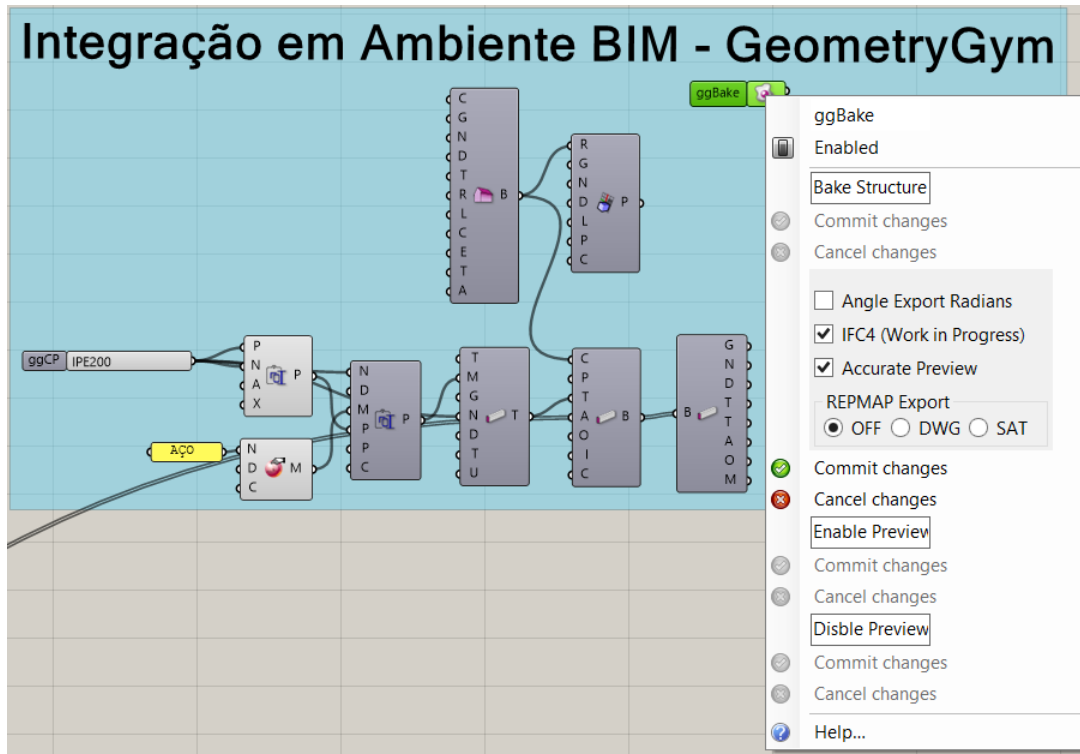


Figura 4.18 - Tradução e exportação do modelo para ambiente BIM com o GeometryGym, através do formato IFC.

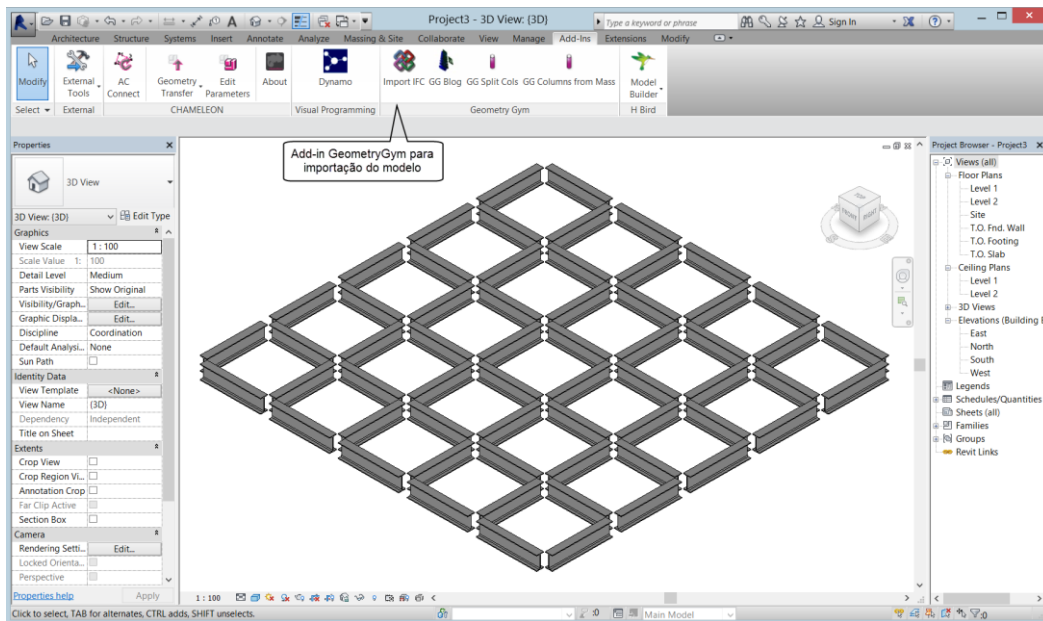


Figura 4.19 - Modelo importado para o Autodesk Revit, através do *add-in* GeometryGym.

Finalmente, na figura 4.20, mostra-se a *framework* apresentado em 4.2, adaptado ao caso prático aqui abordado, que o contextualiza no âmbito do POD.

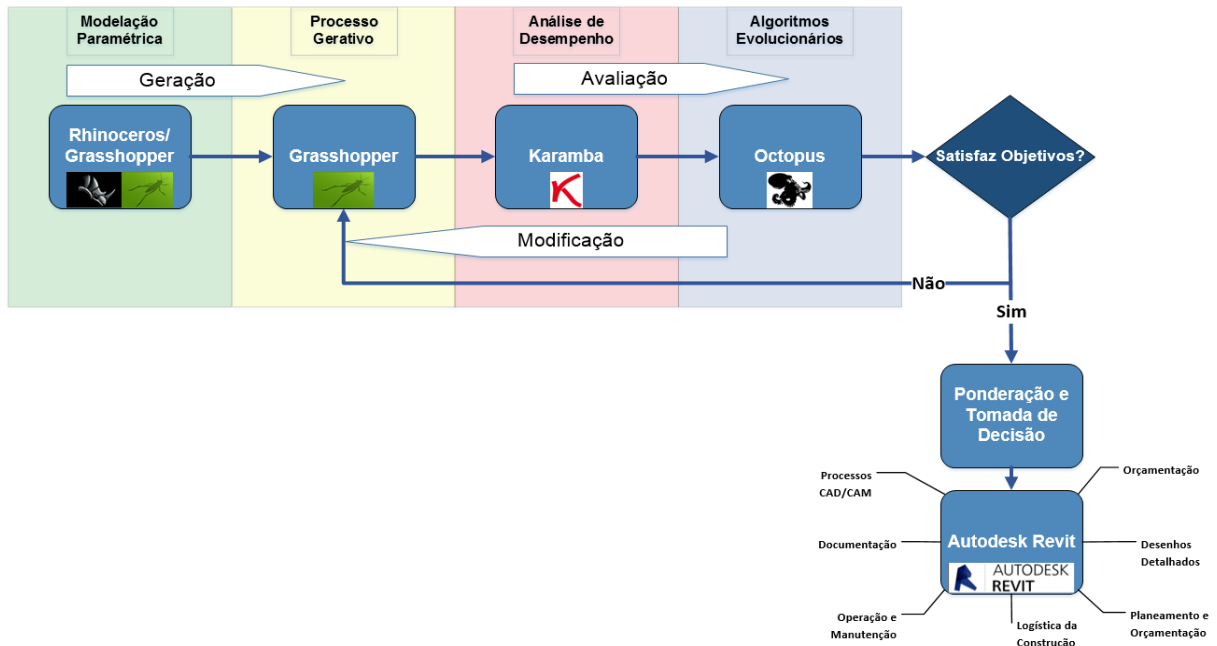


Figura 4.20 - Adaptação do *framework* de aplicação do Projeto Orientado pelo Desempenho ao caso prático abordado.

4.4.2. PROBLEMA 2 – OTIMIZAÇÃO DA FLECHA E MASSA

Este segundo problema é uma extensão do acima descrito. Neste caso prático são adicionados parâmetros e objetivos, transformando-o num problema de otimização multi-objetivo. Ao problema foi adicionada a parametrização da malha ortogonal. Esta passa assim a ter diferentes espaçamentos em cada uma das direções. Do lado da função *fitness*, também o problema passa por encontrar uma solução de compromisso, cujos objetivos são a minimização da flecha e da massa em simultâneo.

Formulação do problema

- Área constante = 25 m²;
- *Mezzanine* retangular apoiado nos seus vértices;
- Parâmetro 1: Comprimento (m)
Intervalo de variação: 2.5 – 10 [m];
- Parâmetro 2: Distância entre perfis segundo a direção X (cm)
Intervalo de variação: 30-100 [cm];
- Parâmetro 3: Distância entre perfis segundo a direção Y (cm)
Intervalo de variação: 30-100 [cm];
- Restrições: Largura = Área/Comprimento (m)
Intervalo de variação: 2.5 – 10 [m];

Excetuando a adição de novos parâmetros e objetivos ao problema, as restantes condições do problema mantêm-se. Deste modo, este segundo problema será aqui resumidamente apresentado, focando-se essencialmente nas diferenças existentes em relação ao primeiro.

Na figura 4.21 apresenta-se a definição do problema, onde a malha ortogonal é definida parametricamente, segundo X e Y, para além do comprimento já incluído no primeiro caso.

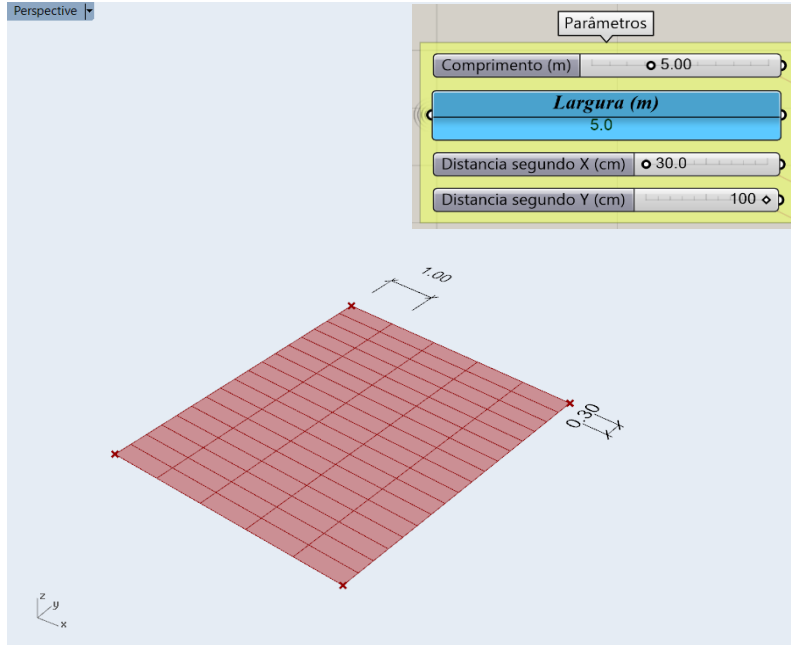


Figura 4.21 - Definição paramétrica do modelo.

Após a definição do modelo no *plug-in* Karamba para a análise estrutural, de forma análoga ao primeiro caso, e com base nos valores de desempenho estrutural fornecidos, é possível definir novos objetivos de otimização. Enquanto no primeiro caso se utilizou apenas a flecha máxima como função *fitness*, neste segundo problema são postos em confronto dois objetivos: a flecha máxima e massa do modelo.

Este é um caso de otimização multi-objetivo, tendo como objetivo fazer um *benchmarking* do conjunto de soluções que satisfazem os objetivos do problema. Desta forma, não existirá uma solução única e inequívoca que minimize simultaneamente ambos os objetivos do problema. Existe, antes, um conjunto de relações entre deslocamento máximo e massa que representam as melhores soluções para o problema. Estas soluções são apelidadas de ótimos de Pareto, tal como discutido em 3.4.5.

Sendo este um problema multi-objetivo, foi utilizado o *plug-in* Octopus para Grasshopper, que permite lidar com problemas desta natureza recorrendo aos AEMO. A figura 4.22 mostra a definição da otimização estrutural realizada com esta ferramenta.

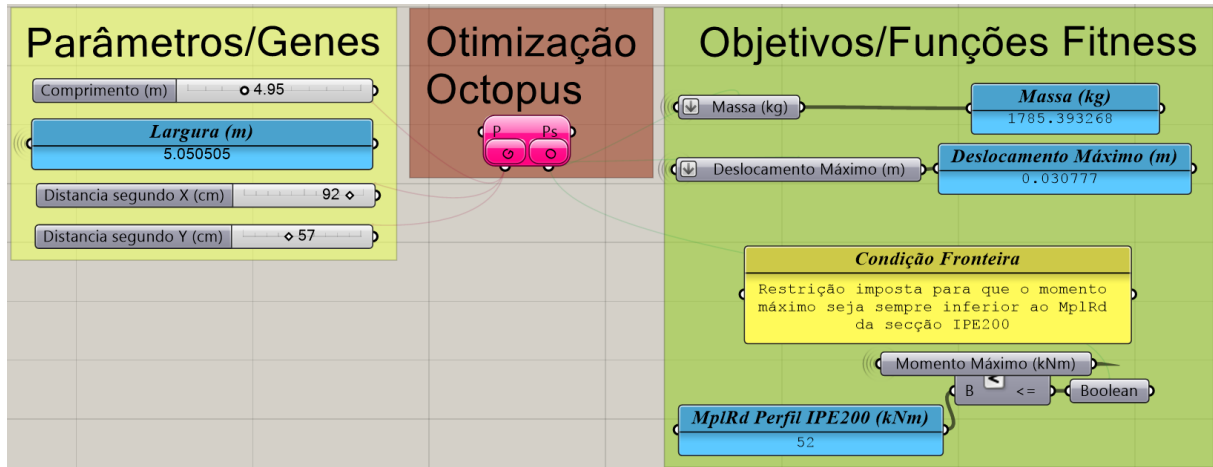


Figura 4.22 - Definição do problema de otimização em Octopus: definição dos parâmetros, objetivos e condição fronteira.

Na figura 4.23 ilustra-se o interface Octopus com os resultados obtidos após evolução ao longo de 15 gerações. É possível observar a fronteira de Pareto, onde residem as soluções que melhor satisfazem os objetivos do problema. A análise do gráfico de Pareto possibilita que, numa mesma via, se englobem resultados absolutos e relativos das várias soluções ótimas. Desta forma é possível fazer um *benchmarking* das várias soluções, consoante os valores absolutos obtidos para cada uma das funções *fitness*, e, por outro lado, comparar os resultados relativamente a outras soluções. Para além das soluções da fronteira de Pareto, o Octopus representa ainda as soluções de elite, representadas a amarelo e vermelho com menor opacidade. Estas soluções são aquelas que, não sendo as optimizadoras, são muito promissoras, e que, por isso, foram guardadas pelo *plug-in* para possível recombinação em futuras gerações.

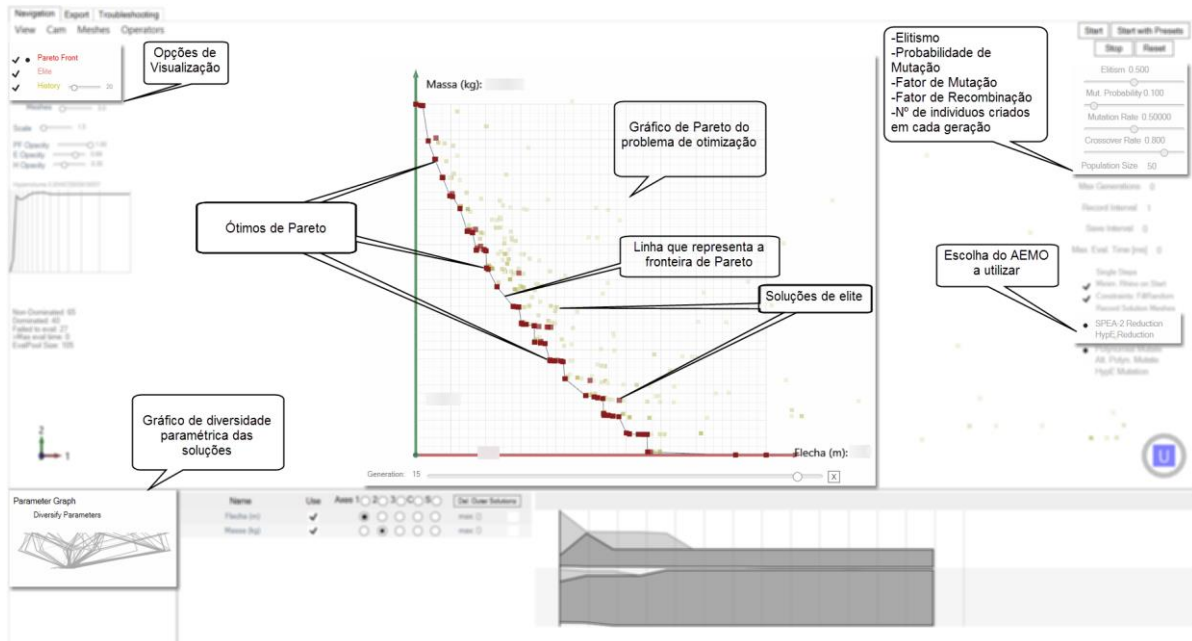


Figura 4.23 - Resultados da otimização Octopus.

Na figura 4.24, ilustra-se uma amostra de soluções representativa do espectro da fronteira de Pareto. Estas soluções estão sintetizadas no quadro 4.1, onde é possível verificar que: as soluções tendem a aproximar-se do valor de 5 m de comprimento, como seria expetável e embora o número de gerações seja pequeno. Por outro lado, verifica-se que as soluções de maior massa têm menores deslocamentos máximos e vice-versa. Com estes valores é possível fazer um *benchmarking* às diferentes soluções e optar por aquela que melhor se encaixe nos propósitos do projeto. Por exemplo, caso se pretenda uma solução leve (e também mais económica), aquela que oferecerá a melhor relação de compromisso (de entre as seleccionadas) será a número 4, embora se sacrifique ligeiramente a rigidez da estrutura.

Finalmente, a transferência do modelo para ambiente BIM é em tudo similar à do primeiro caso prático, não sendo, por isso, aqui objeto de repetição. Também a contextualização no *framework* POD se assemelha, alterando-se apenas a ferramenta de otimização do Galapagos para o Octopus.

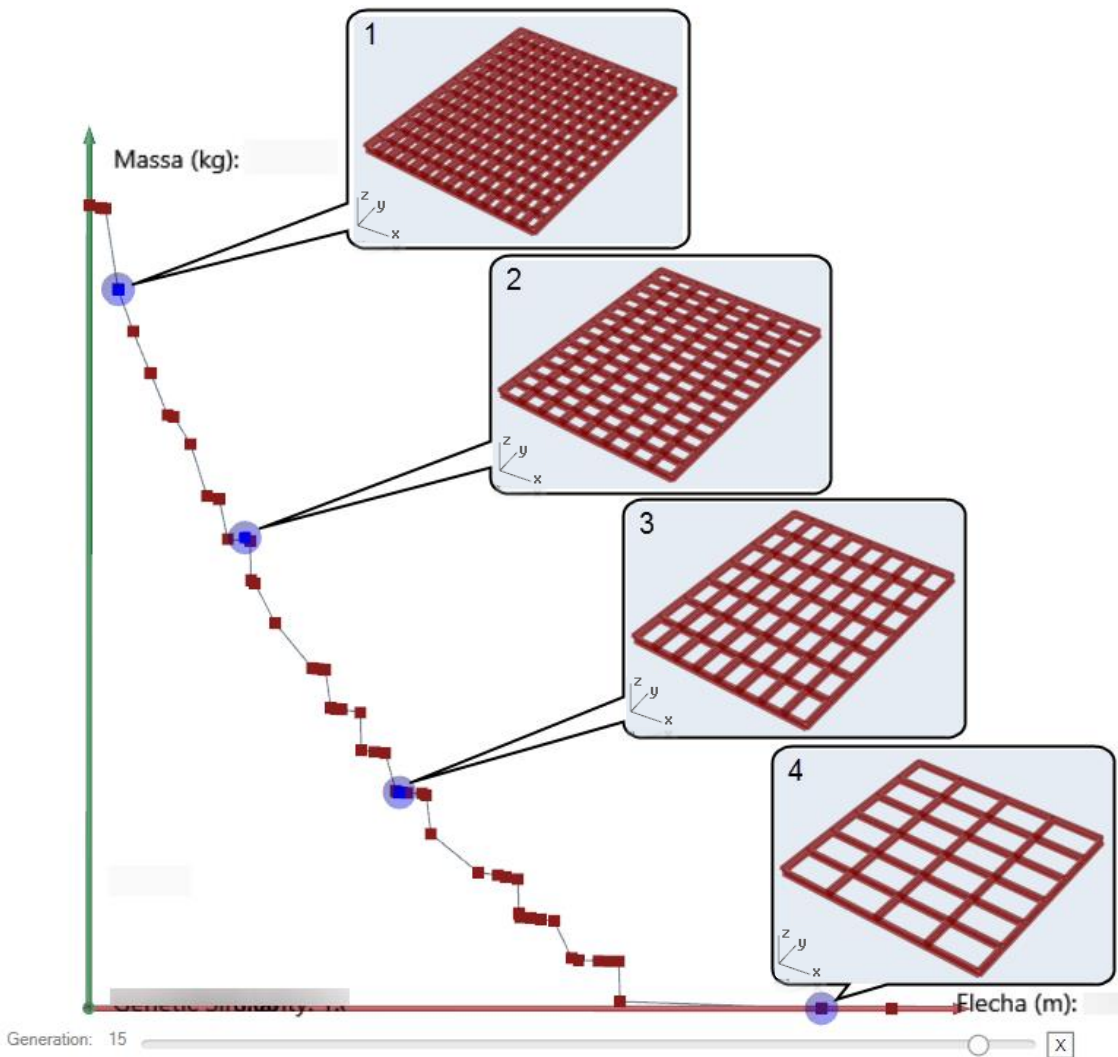


Figura 4.24 - Amostra representativa do espectro de soluções da fronteira de Pareto.

Quadro 4.1 - Valores dos parâmetros e respetivos valores de desempenho estrutural das soluções selecionadas.

	Parâmetros/Genes			Objetivos/Funções <i>Fitness</i>	
	Comprimento	Distância entre perfis segundo X	Distância entre perfis segundo Y	Deslocamento Máximo	Massa
	m	cm	cm	mm	kg
1	5.03	38	37	19.581	3244.7
2	5.07	37	67	23.997	2565.3
3	5.06	71	65	28.150	1903.1
4	4.36	94	98	36.361	1385.7

5

CASO DE ESTUDO

5.1. DESCRIÇÃO E MOTIVAÇÃO

No âmbito da colaboração com a empresa bimTEC, propõe-se a elaboração de um caso de estudo que permita repercutir os conceitos explorados neste trabalho, harmonizando-os com a prática da empresa. Neste contexto, e tendo a empresa uma forte conexão com a vertente de projeto estrutural, o caso de estudo foca-se nesta componente de projeto, não descurando porém, o âmbito mais transversal que este trabalho versa. Assim, este caso de estudo pretende contextualizar o processo de construção geométrica parametrizada de modelos para análise e otimização estrutural, respeitando a sua conexão e integração no âmbito multidisciplinar dos projetos da AEC.

O caso de estudo foi idealizado com intuito de testar os processos integrados de modelação, análise e otimização discutidos neste trabalho, explorando ferramentas digitais que os suportam.

Durante a idealização do caso de estudo, entendeu-se que as suas premissas orientadoras deviam, por um lado, demonstrar as possibilidades da modelação paramétrica na construção e controlo geométrico do modelo e, por outro, gerar diversas soluções estruturais que possibilitem a análise e otimização do seu desempenho estrutural. Assim, o caso de estudo é estruturado numa lógica que permita demonstrar a aplicabilidade de processos gerativos e orientados pelo desempenho, com intuito de se aproximar a uma situação real de projeto.

O projeto concebido para este caso de estudo é uma estátua em estrutura metálica, que se assemelha à forma de um cristo-rei, tendo, por isso, sido apelidado com este nome. O desenvolvimento do modelo, parte de um caso base ilustrado na figura 5.1.

Como mostrado na figura 5.1, o modelo é composto por uma estrutura treliçada, subdividida geometricamente em três partes: fuste central, braços e cabeça. O fuste central é constituído por anéis treliçados sobrepostos verticalmente. Cada anel, ao longo do seu perímetro, compõe-se de prumos verticais, diagonais e banzos que formam o seu sistema estrutural. Cada banzo encontra-se ainda ligado a elementos horizontais concêntricos. Os braços e a cabeça são também sistemas treliçados que se encontram ligados ao fuste através do anel superior. Os prumos verticais do anel inferior, ao nível do terreno, fazem a ligação da estrutura com as fundações.

A modelação foi feita recorrendo ao *software* NURBS/CAD Rhinoceros, em conjunto com a ferramenta de modelação algorítmica/programação visual Grasshopper, já aqui enunciados neste trabalho.

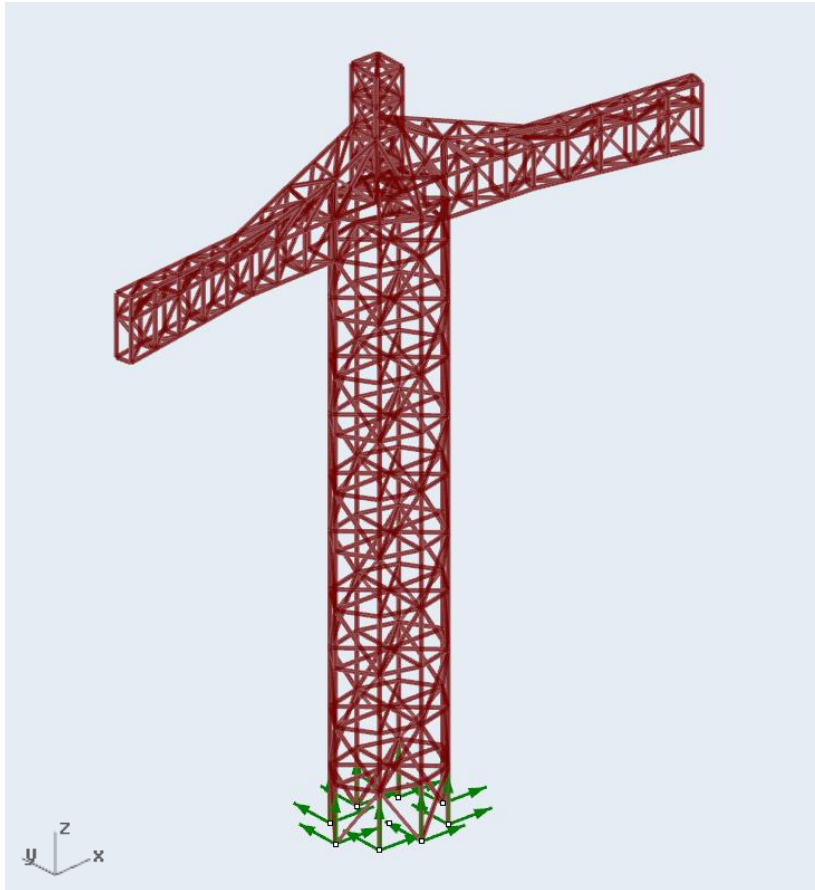


Figura 5.1 - Caso base considerado para o desenvolvimento do modelo.

5.2. CONSTRUÇÃO DO MODELO

A construção paramétrica do modelo partiu das coordenadas dos pontos de apoio que, no caso base, formam um octógono achatado segundo o eixo Y. Na figura 5.2 ilustram-se as coordenadas destes pontos e o polígono base.

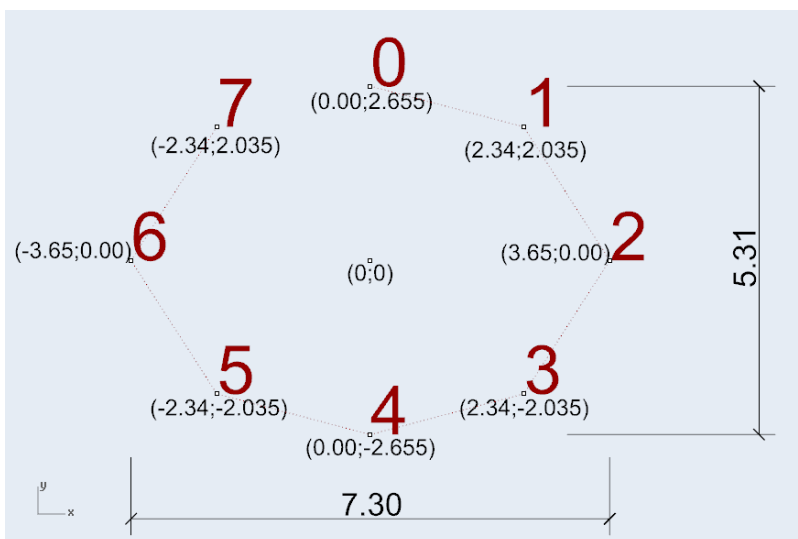


Figura 5.2 - Coordenadas dos pontos base para a definição paramétrica.

A coordenação geométrica do modelo assenta em *scripts* de programação visual Grasshopper. Estes *scripts* constituem-se por três blocos de código em conformidade com a subdivisão geométrica acima descrita. Na figura 5.3 ilustra-se um diagrama com a estruturação, e os parâmetros geométricos embebidos em cada um destes blocos de código.

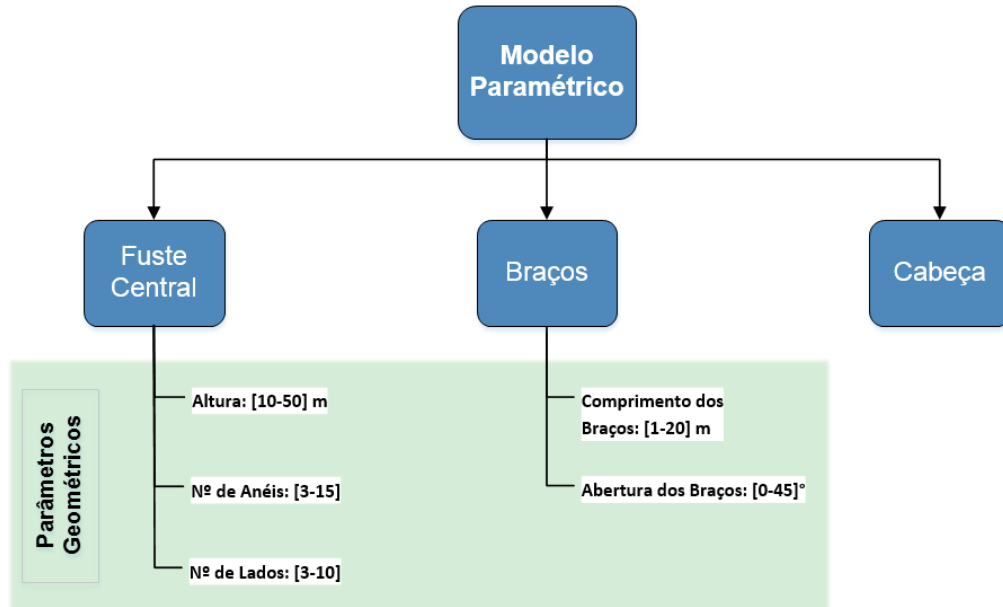


Figura 5.3 - Estruturação dos *scripts* Grasshopper para coordenação geométrica do modelo.

Após a construção paramétrica, foi possível manipular o modelo de acordo com os parâmetros definidos, e assim obter várias configurações geométricas do modelo. De modo a ilustrar o espectro de soluções possíveis, na figura 5.4, exemplificam-se quatro configurações possíveis e os respetivos valores paramétricos atribuídos.

A construção do modelo teve sempre em consideração a interligação das entidades geométricas envolvidas, quer as fixas, quer as parametrizadas. Deste modo foi possível obter um modelo que se mantém coerente e adaptado a ajustes geométricos que se pretendam fazer, potenciando os processos gerativos de projeto, bem como a análise e otimização de várias soluções geométricas.

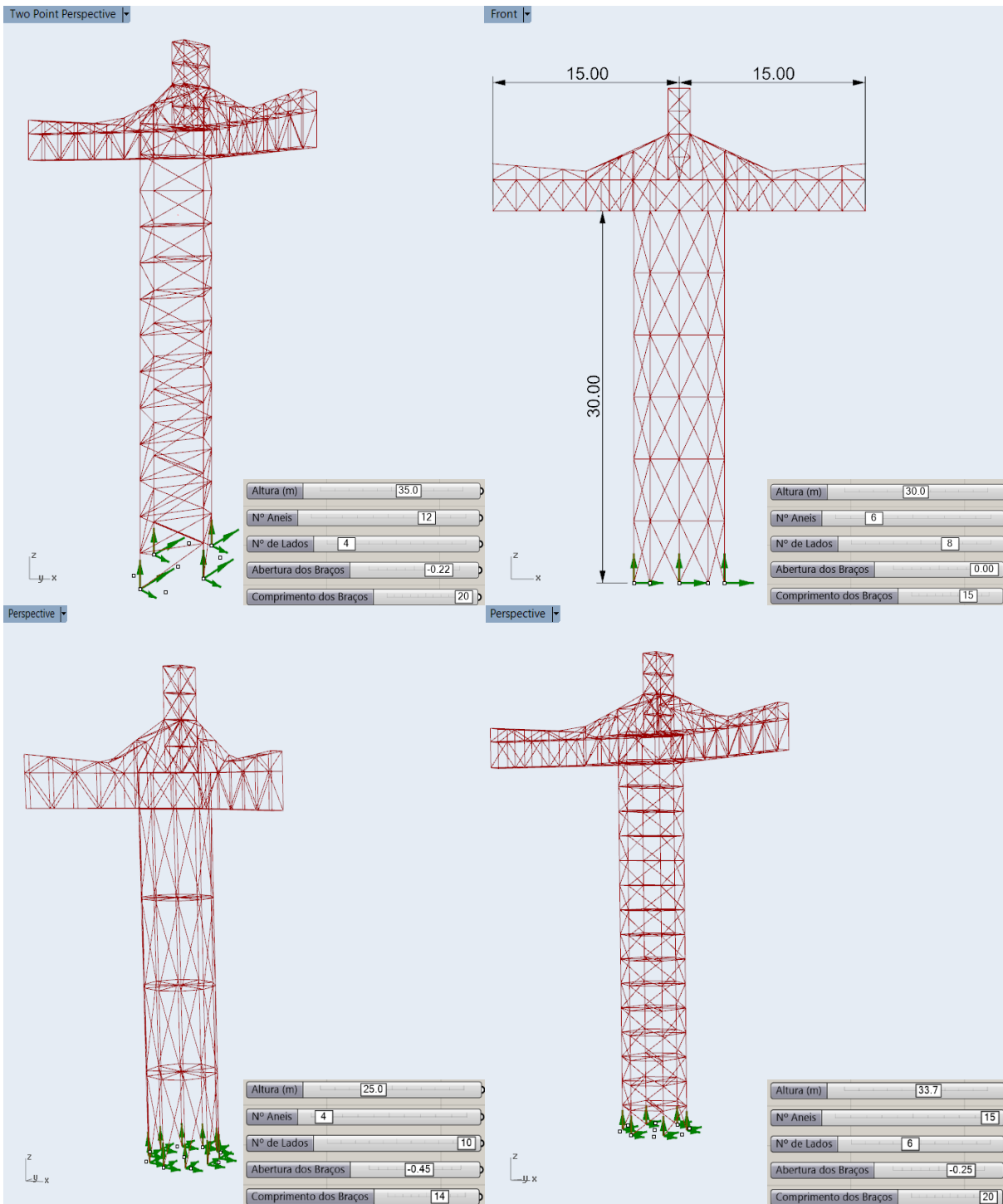


Figura 5.4 - Manipulação geométrica do modelo: quatro configurações possíveis e respetivos valores paramétricos.

5.3. ANÁLISE DE DESEMPENHO

A partir do modelo acima descrito, foi selecionado apenas o fuste central para análise sob a ação de uma força horizontal, através do *plug-in* Karamba. Para isto estruturou-se o modelo em quatro famílias de elementos geométricos: Prumos verticais (superiores e inferiores); Diagonais; Anéis; e “Barras concêntricas”. Na figura 5.5 apresenta-se o modelo do caso base, atribuindo cores diferentes a cada uma das famílias.

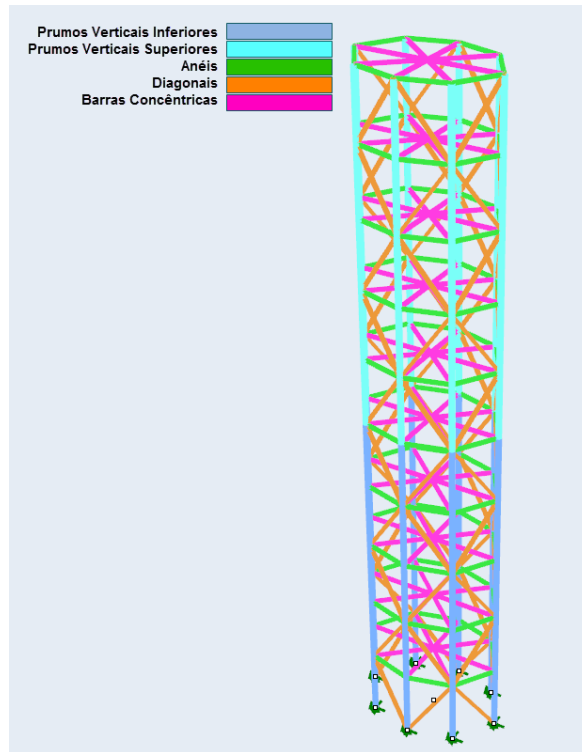


Figura 5.5 - Subdivisão do modelo em famílias de elementos estruturais.

Cada uma destas famílias subdivide-se em elementos individuais, conforme o piso a que pertencem. Assim é possível organizar os elementos estruturais de acordo com o tipo de secção que lhes são atribuídos, e que assentam nos seguintes pressupostos:

- **Família dos Anéis;**

Em cada piso, o anel tem sempre a mesma secção, podendo, no entanto, variar as secções de piso para piso.

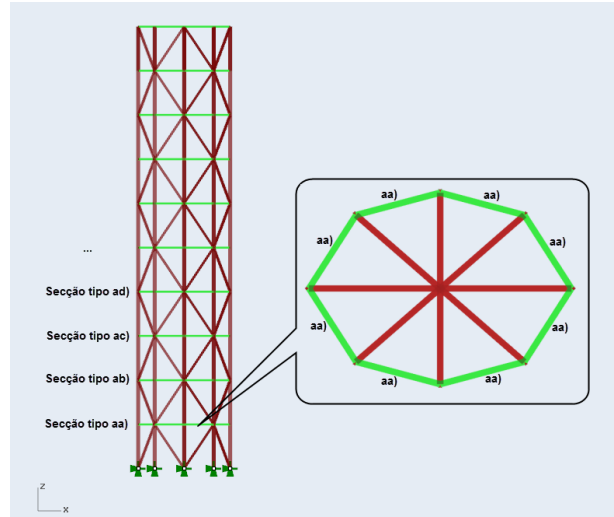


Figura 5.6 - Família dos Anéis: Subdivisão da família por tipos de seção atribuídas.

- **Família das Diagonais**

Em cada piso, as diagonais têm sempre a mesma seção, podendo, no entanto, variar as seções de piso para piso.

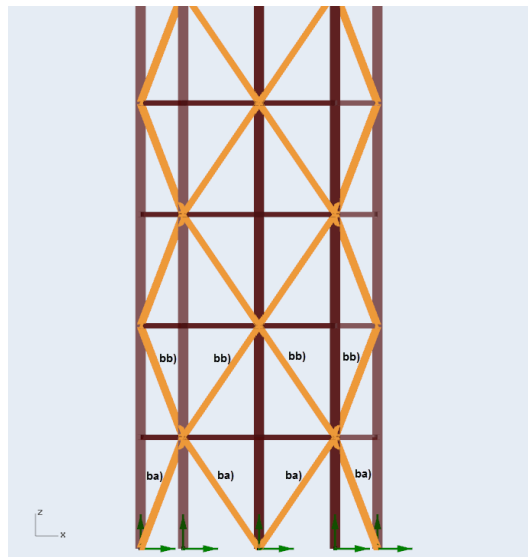


Figura 5.7 - Família das Diagonais: Subdivisão da família por tipos de seção atribuídas.

- **Família das “Barras Concêntricas”**

Em cada piso, as diagonais têm sempre a mesma seção, podendo, no entanto, variar as seções de piso para piso.

- **Família dos Prumos Verticais**

Ao nível de um mesmo piso, todos os prumos têm a mesma seção. Em altura podem assumir, uma ou duas seções diferentes, consoante o número de pisos seja inferior ou superior a cinco pisos, respetivamente. Assim, os prumos verticais podem desmembrar-se em duas subfamílias de prumos inferiores e superiores caso existam seis ou mais pisos (figura 5.5). Deste modo, no máximo existem duas seções diferentes para os prumos verticais do modelo.

5.3.1. CONDIÇÕES INICIAIS

Com vista à análise do desempenho estrutural do fuste no Karamba, formulou-se o problema com base nas seguintes condições:

- **Altura total do fuste:**
35 m;
- **Material:**
Aço S235;

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	#			E	G	gamma	alphaT	fyd
2	#	family	name	[kN/cm ²]	[kN/cm ²]	[kN/m ³]	[m/(mC°)]	[kN/cm ²]
3		Steel	Steel	21000	8076	78.5	1.20E-05	23.5
4		Steel	S235	21000	8076	78.5	1.20E-05	23.5
5		Steel	S275	21000	8076	78.5	1.20E-05	27.5
6		Steel	S355	21000	8076	78.5	1.20E-05	36
7		Steel	St37-2	21000	8076	78.5	1.20E-05	24
8	#							

Figura 5.8 - Extrato da base de dados de materiais e respetivas propriedades mecânicas utilizadas pelo Karamba (Preisinger, C., 2014).

- **Ações:**
 - Peso próprio;
 - Força horizontal de 2500 kN aplicada segundo o eixo forte (eixo Y), fazendo a estrutura trabalhar no eixo fraco (eixo X) – situação mais desfavorável para o dimensionamento porque traz maior instabilidade estrutural.

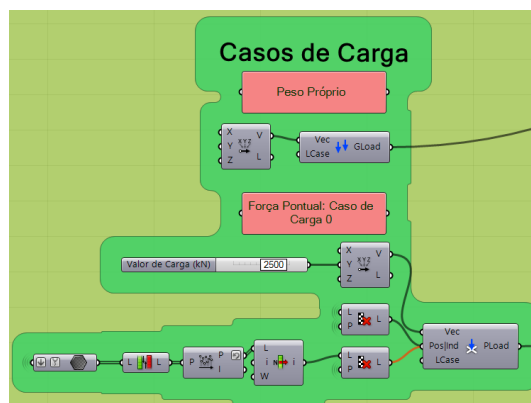


Figura 5.9 - Ações consideradas.

- **Condições de apoio:**
Translações bloqueadas segundo os três eixos.

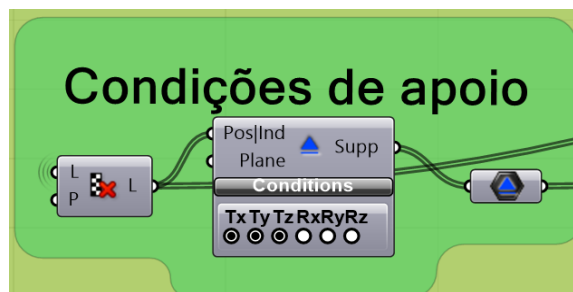


Figura 5.10 - Condições de apoio consideradas.

▪ **Tipo de secção a atribuir a cada família:**

- Família dos Anéis, Diagonais e Barras Concêntricas – Perfis HEA; De acordo com a biblioteca de secções Karamba, como ilustrado na figura 5.11.
- Família dos Prumos Verticais – Perfis CHS (perfis tubulares ocos); De acordo com a biblioteca de secções Karamba, como ilustrado na figura 5.11.

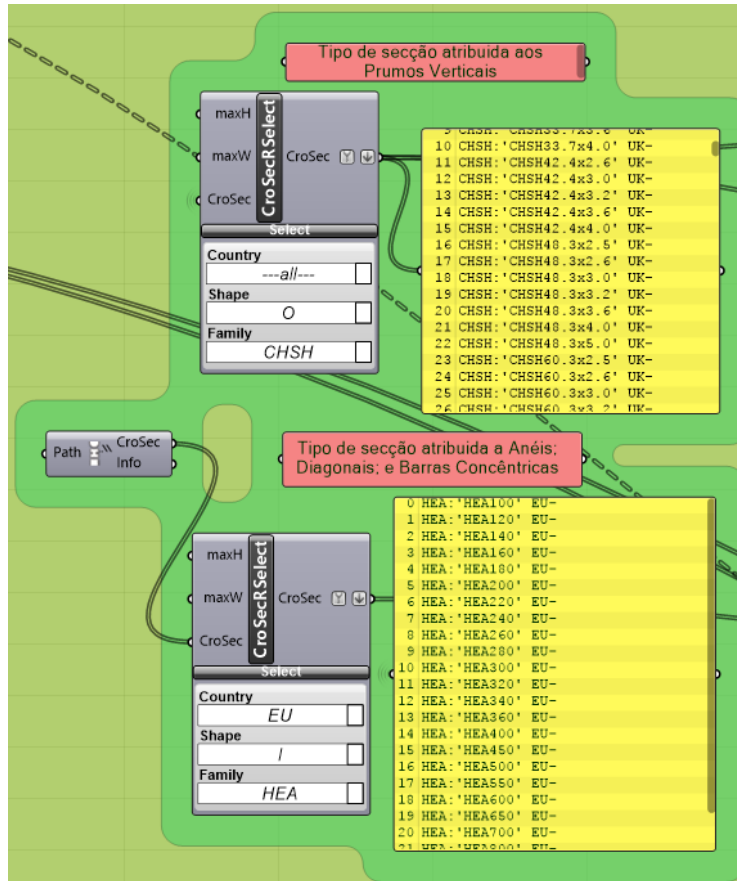


Figura 5.11 - Tipos de secções a atribuir a cada família, retiradas da biblioteca de secções Karamba.

5.3.2. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

Neste subcapítulo estrutura-se o problema sob o ponto de vista da sua análise e otimização de desempenho estrutural. Partindo das considerações iniciais formulou-se o problema da seguinte forma:

▪ **Parâmetros/Genes:**

- Número de lados do fuste; Intervalo de variação – [3-10];
- Número de anéis do fuste; Intervalo de variação – [3-15].

▪ **Objetivos/Funções *Fitness*:**

- Seleção da secção mais apropriada para cada elemento do modelo, tendo como base a lista de secções Karamba atribuída a cada família. Isto tem em conta a capacidade resistente da secção e o deslocamento máximo prescrito, com um procedimento a pormenorizar em 5.3.3;
- Massa total do fuste (minimizar);
- Deslocamento máximo nodal (minimizar).

▪ **Restrições:**

- Deslocamento máximo nodal prescrito é 175 mm; Advém da razão Altura/200;
- Todos os elementos devem verificar a capacidade resistente da secção que lhes é atribuída.

5.3.3. ANÁLISE E OTIMIZAÇÃO DE DESEMPENHO

O procedimento de otimização utilizado segue um processo iterativo comandado pela ferramenta de otimização multi-objetivo Octopus. Este processo iterativo decompõe-se em seis fases que se ilustram na figura 5.12.

Quando o processo se inicia, o Octopus vai gerar novos indivíduos com base na variação dos parâmetros/genes definidos. Sendo estes parâmetros de caráter geométrico, estes vão repercutir-se numa nova configuração geométrica do modelo, que consequentemente se refletem num novo modelo Karamba.

Para cada indivíduo gerado parametricamente, o respetivo modelo Karamba, será então analisado através do componente para otimização de secções disponível no Karamba. Neste otimizador de secções configuraram-se as restrições ao problema. Assim, qualquer solução que não respeite as restrições será, posteriormente, descartada pelo Octopus.

Das soluções que satisfazem as restrições impostas, o Octopus vai analisar e classificar os seus resultados, no que aos objetivos do problema dizem respeito.

Sendo que, a cada configuração geométrica - ou indivíduo – gerada, correspondem determinados valores de massa e deslocamento, o Octopus vai iterativamente analisando e classificando cada indivíduo, formando a fronteira de Pareto com aqueles que melhor satisfazem ambos os objetivos do problema.

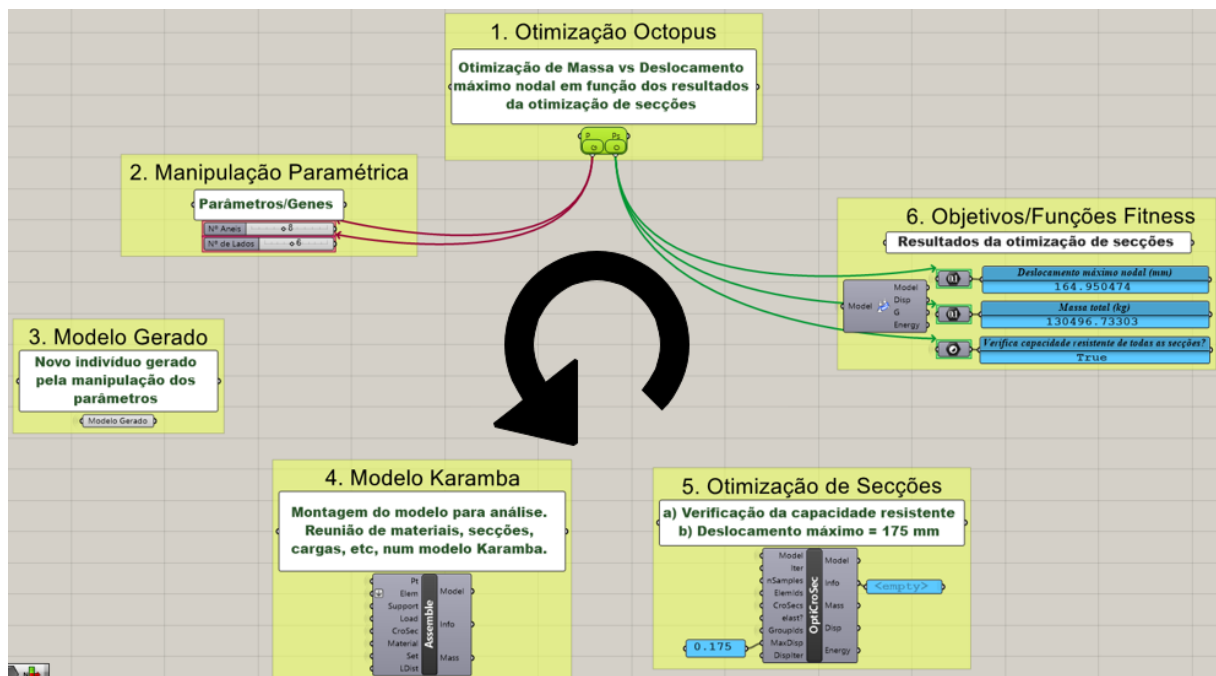


Figura 5.12 - Processo iterativo de otimização.

O processo de otimização multi-objetivo Octopus foi já descrito em 3.4.5 e 4.4.2. No entanto, o componente de otimização de secções do Karamba (*Optimize Cross Section*) carece ainda de um aprofundamento. Na figura 5.13 exibe-se este componente devidamente legendado. Todas estas considerações têm como base o disposto no manual de utilização do *plug-in* Karamba v1.0.5 (Preisinger, C., 2014).

O componente *Optimize Cross Section* do Karamba funciona, também, segundo um processo iterativo. Primeiro o componente determina, para cada elemento do modelo, a primeira secção que respeita a capacidade resistente em função das ações consideradas. Deste modo, o componente assume que as listas de secções, atribuídas a cada família, estejam ordenadas de acordo com a sua altura, uma vez que o componente percorre iterativamente a lista das secções até encontrar a primeira que, para cada elemento, tenha a capacidade resistente necessária. Na figura 5.11 mostra-se esta lista devidamente ordenada. De modo a determinar a secção que satisfaz a capacidade resistente de cada elemento, o componente utiliza o seguinte processo iterativo (Preisinger, C., 2014):

1. Determinação dos esforços em “*nSamples*” (pontos de controlo) ao longo de cada elemento utilizando a primeira secção disponível na lista de secções desse dado elemento;
2. Para cada conjunto de elementos definidos - isto é, para as condições de subdivisão das famílias definidas em 5.3 - seleciona-se a primeira secção que verifica a capacidade resistente de todos os elementos desse conjunto;
3. Caso não sejam necessárias alterações na etapa 2 ou o máximo número de iterações tenha sido atingido, o algoritmo para. Caso contrário, retorna à etapa 1 utilizando a secção selecionada na etapa 2.

Após assegurar a segurança do modelo em relação à rotura, o componente vai, num novo processo iterativo, tentar atingir o deslocamento máximo prescrito.

Para determinar se uma dada secção é suficiente para os esforços instalados, o Karamba aplica um procedimento que se aproxima daquele que é utilizado para o aço de acordo com o Eurocódigo 1993-1-1. Este leva em consideração o esforço axial, flexão bi-axial, torção, e esforço transversal, sendo explicitado com mais detalhe em (Preisinger, C., 2014)

Quando as ações consideradas ultrapassam a capacidade resistente da maior secção disponível na lista de secções, o componente reporta um aviso no *output* “*Info*” (Preisinger, C., 2014).

Sendo este um processo com iterações definidas e limitadas, não existe garantia que a solução convirja sempre para os resultados pretendidos. O objetivo deste procedimento é, assim, de ilustrar soluções plausíveis no que à escolha de secções diz respeito. O algoritmo por detrás do componente atua segundo algumas simplificações e omite alguns fenómenos que se podem revelar decisivos no dimensionamento (Preisinger, C., 2014).

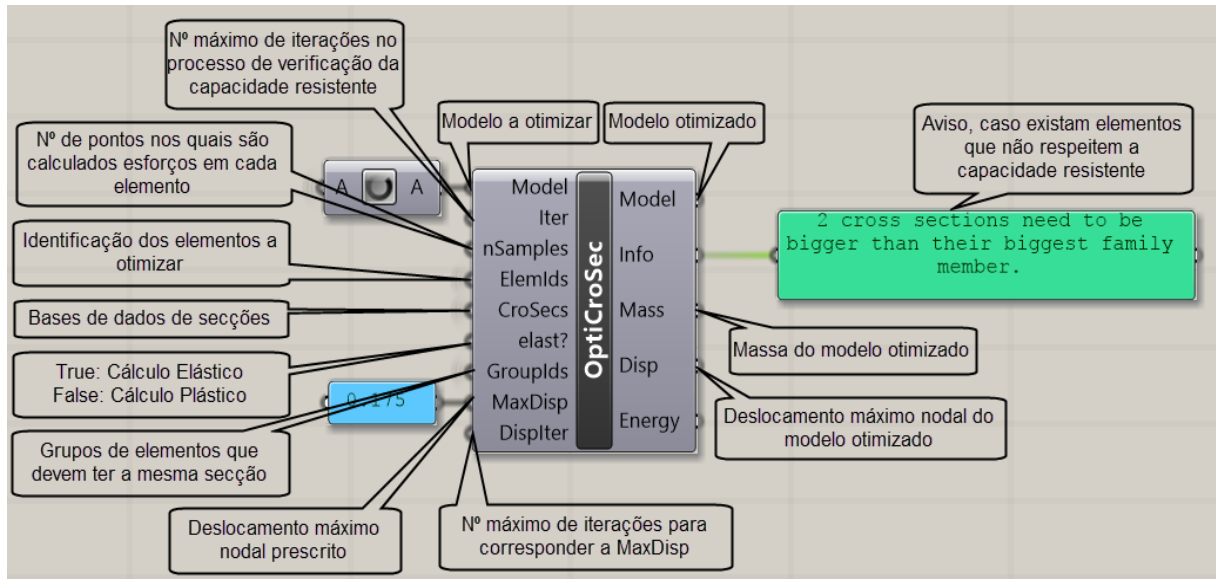


Figura 5.13 - Componente *Optimize Cross Section* do *plug-in* Karamba: Legenda de *inputs* e *outputs*.

Finalmente restam definir as configurações de otimização utilizada para o otimizador de secções Karamba e para o Octopus:

- ***Optimize Cross Section* – Karamba**

- Iter: 7;
- nSamples: 5;
- True: Cálculo elástico;
- MaxDisp: 0.175 m;
- DispIter: 20.

- **Octopus**

- 100 indivíduos por geração;
- Algoritmo SPEA-2;
- Mutação Hype.

5.4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Após evoluir a população ao longo de 30 gerações, o otimizador Octopus encontrou 9 soluções que definem a fronteira de Pareto. Este problema, do ponto de vista dos algoritmos evolucionários, é um problema com uma pequena diversidade genética e bastante restringido. Por um lado os genes considerados apenas podem tomar valores inteiros, num intervalo de variação de 13 para o caso do número de anéis, e de 7 para o do número de lados. Por outro, é também muito restringido pelo otimizador de secções ao limitar o deslocamento máximo e que todas as soluções devem cumprir os requisitos de capacidade de resistência. Consequentemente, muitas das soluções geradas são automaticamente eliminadas, fazendo com que a exploração do terreno *fitness* esteja bastante condicionada. É possível verificar que há poucas melhorias na fronteira de Pareto ao longo das gerações, concluindo-se que o problema convergiu rapidamente para os ótimos e estagnou. Na figura 5.14 mostram-se os resultados obtidos na geração 5 e geração 30.

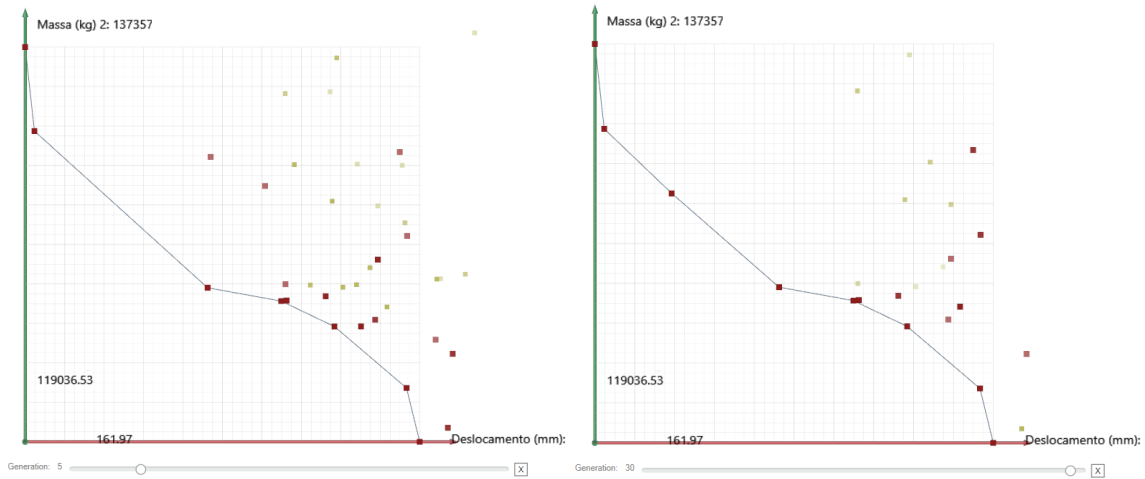


Figura 5.14 - Resultados da otimização Octopus: à esquerda geração 5; à direita geração 30.

No quadro 5.1 resumem-se os resultados obtidos para as soluções da fronteira de Pareto de acordo com a numeração proposta na figura 5.15 para a geração 30. Da análise destes resultados é possível verificar que as soluções 8 e 9 ultrapassam ligeiramente o limite de 175 mm de deslocamento máximo nodal. Isto deveu-se ao fato de o otimizador de secções não ter conseguido atingir este limite dentro das 20 iterações definidas. Ambas as soluções cumprem os requisitos de capacidade resistente, no entanto, ultrapassam os 175 mm.

Na figura 5.16, ilustram-se as opções de visualização de resultados possíveis. Uma primeira é a visualização dos deslocamentos em toda a estrutura, e a segunda o grau de utilização dos elementos, calculado pela razão entre a tensão instalada num ponto e a tensão de cedência do respetivo material. Pela convenção, os elementos a vermelho representam elementos a trabalhar à compressão, e a azul à tensão. Caso algum elemento ultrapasse $\pm 100\%$ de utilização, ou o deslocamento máximo prescrito (175mm) será assinalado a uma cor diferente de modo a que seja facilmente identificado (Preisinger, C., 2014).

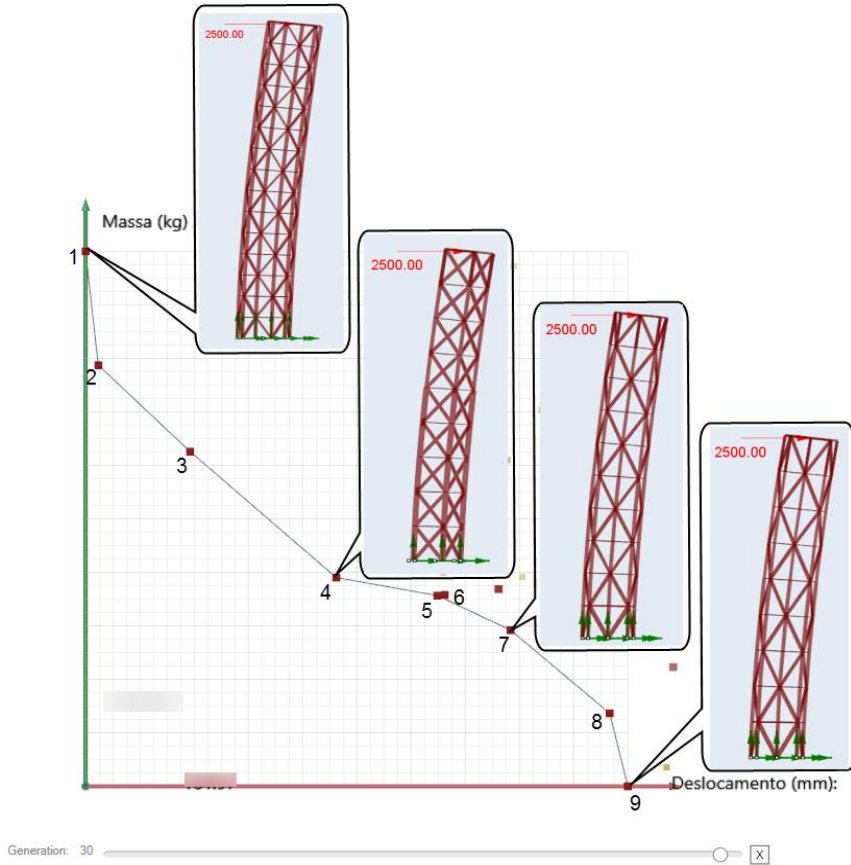


Figura 5.15 - Visualização e numeração dos resultados da fronteira de Pareto.

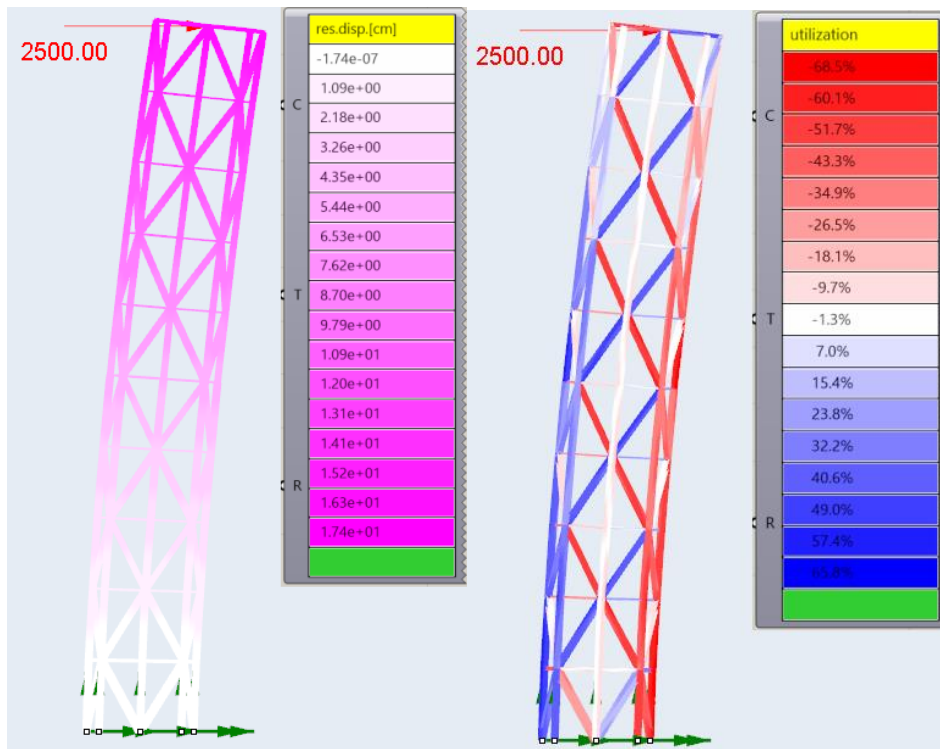


Figura 5.16 – Opções de visualização de resultados no Karamba. À esquerda: deslocamentos nodais. À direita: percentagem de utilização dos elementos.

Quadro 5.1 - Resultados das soluções da fronteira de Pareto: Parâmetros e Objetivos.

	Parâmetros/Genes		Objetivos/Funções <i>Fitness</i>	
	Nº Anéis	Nº de Lados	Deslocamento Máximo Nodal	Massa
	-	-	mm	kg
1	15	10	161.97	137 358
2	9	6	162.33	133 461
3	8	6	164.95	130 497
4	9	5	169.12	126 187
5	14	6	172.00	125 568
6	10	6	172.21	125 593
7	10	8	174.09	124 382
8	7	5	176.92	121 532
9	9	8	177.43	119 036

No quadro 5.2 resumem-se as mesmas soluções no que concerne às secções que lhes foram atribuídas em função do disposto em 5.3.1. Analisando o quadro 5.2, é possível verificar que as soluções com menor número de lados e anéis são acompanhadas por secções maiores, de forma a cumprirem os objetivos do problema. Os elementos que são mais afetados por estes parâmetros são os prumos verticais e as diagonais que vêm as suas secções aumentar mais acentuadamente que as restantes famílias. Isto deve-se à maior solicitação estrutural a que estes elementos se encontram sujeitos comparativamente às restantes famílias, e que se realça mais à medida que o valor dos parâmetros é menor.

Quadro 5.2 - Secções atribuídas pelo otimizador de secções nas soluções da fronteira de Pareto.

Famílias					
	Secções atribuídas	Anéis	Barras Concêntricas	Prumos Verticais	Diagonais
1	Maior secção	HEA240	HEA200	CHS406.4x25.0	HEA260
	Menor secção	HEA100	HEA100	CHS406.4x25.0	HEA220
2	Maior secção	HEA240	HEA260	CHS508.0x50.0	HEA400
	Menor secção	HEA180	HEA100	CHS406.4x30.0	HEA280
3	Maior secção	HEA260	HEA240	CHS508.0x50.0	HEA450
	Menor secção	HEA100	HEA100	CHS355.6x25.0	HEA280
4	Maior secção	HEA260	HEA260	CHS508.0x50.0	HEA300
	Menor secção	HEA100	HEA100	CHS406.4x40.0	HEA240
5	Maior secção	HEA260	HEA260	CHS508.0x50.0	HEA340
	Menor secção	HEA100	HEA100	CHS406.4x30.0	HEA260
6	Maior secção	HEA260	HEA260	CHS508.0x50.0	HEA340
	Menor secção	HEA100	HEA100	CHS406.4x30.0	HEA260
7	Maior secção	HEA240	HEA220	CHS406.4x40.0	HEA360
	Menor secção	HEA100	HEA100	CHS355.6x25.0	HEA260
8	Maior secção	HEA240	HEA240	CHS559.0x50.0	HEA400
	Menor secção	HEA100	HEA100	CHS273.0x25.0	HEA400
9	Maior secção	HEA280	HEA220	CHS406.4x40.0	HEA400
	Menor secção	HEA100	HEA100	CHS323.9x20.0	HEA280

O Karamba possui também uma funcionalidade de exportação de modelos para os *softwares* Autodesk Robot Structural Analysis e RStab, possibilitando assim a análise do modelo num programa especializado e mais rigoroso. O formato de transferência é o DStV (*Deutsche Stahlbau-Verband*). A exportação para estes *softwares* é bastante fácil e mantém todas as propriedades geradas pelo Karamba, como condições de carga, apoios, materiais e secções atribuídas pelo otimizador.

Para finalizar a demonstração da metodologia POD é necessário promover a exportação do modelo para ambiente BIM, neste caso com recurso ao *software* Autodesk Revit. Com já foi referido, a análise FEM implica a tradução da geometria gerada num modelo Karamba, que lhe atribuí um significado semântico próprio. Isto significa que a geometria gerada pelo Rhinoceros/Grasshopper é traduzida num “formato próprio” pelo Karamba, de forma a incorporar as propriedades necessárias à sua análise estrutural. Algumas destas propriedades são as condições de apoios, materiais atribuídos, condições de carga, ligação e interação estrutural entre elementos, secções atribuídas a cada elemento, entre outros. Para isto o Karamba recorre a bibliotecas próprias, onde tem definidas estas propriedades. Atualmente o *plug-in* ainda não prevê nenhum método de exportação para BIM, como IFC por exemplo. Assim, não é possível

exportar diretamente o modelo para ambiente BIM de modo a que este mantenha o significado semântico atribuído pelo Karamba. Apenas é possível exportar a geometria resultante, através de um dos *plug-ins* de interoperabilidade discutidos em 2.4. Ao exportar a geometria com um destes *plug-ins*, o modelo iria perder todas propriedades que o Karamba lhe incorporou, ficando, por isso, no contexto puramente geométrico. Esta não é a situação desejável neste caso, uma vez que a informação fundamental fornecida pela análise de desempenho Karamba reside no seu significado semântico, nomeadamente das secções atribuídas.

Como já foi discutido anteriormente, os métodos de interoperabilidade (assim como grande parte dos *plug-ins*) entre o Rhinoceros/Grasshopper e o Autodesk Revit estão ainda numa fase de maturação, e apresentam ainda algumas lacunas, especialmente em modelos com significado semântico, cuja tradução é ainda algo deficiente.

Por outro lado, exportar o modelo para o Autodesk Robot Structural Analysis e de seguida fazer a ligação com o Autodesk Revit, através da ferramenta Structural Analysis Toolkit da Autodesk, também não é possível. Esta ferramenta só funciona em modelos criados de raiz no *software* BIM da Autodesk, e, portanto, não se encaixa neste caso.

Para contornar este problema é necessário traduzir manualmente, sob a forma de famílias Revit, as secções atribuídas pelo Karamba em cada modelo gerado. Este processo, ainda que não seja o mais adequado uma vez que exige trabalho adicional, é o caminho possível de modo a manter o significado semântico do modelo em ambiente BIM. De modo a ilustrar este processo seleccionou-se a solução 7. A ferramenta de interoperabilidade Superb Lyrebird possibilita a criação de um *stream* direto de tradução dos modelos. A vantagem deste *plug-in* de interoperabilidade é a tradução de dados entre as ferramentas e não apenas de elementos geométricos, utilizando o API de ambos os *softwares*.

Na figura 5.17 ilustra-se o interface do *plug-in* Superb Lyrebird em Grasshopper e em Autodesk Revit.

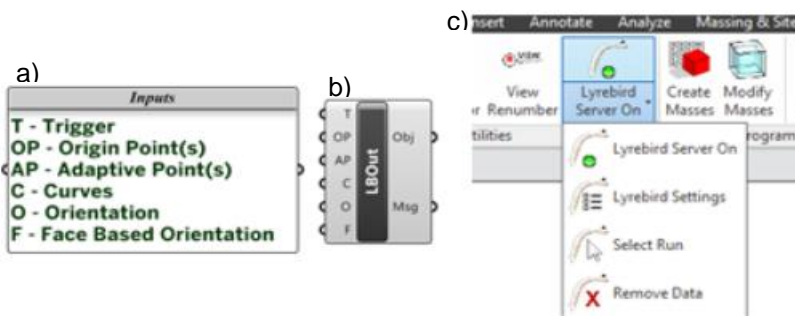


Figura 5.17 – Interface do *plug-in* Superb Lyrebird: a) *Inputs* geométricos possíveis em Grasshopper; b) Componente em Grasshopper; c) Componente em Autodesk Revit (Logan, T., 2014).

Utilizando a subdivisão de famílias definida em 5.3, que guiou o processo de atribuição e otimização de secções do Karamba, é possível fazer corresponder a cada grupo de elementos uma família Revit condizente. Cada grupo de elementos definidos tem sempre a mesma secção e, assim, é possível atribuir-lhes a correspondente família Revit. Por exemplo, na solução 7, o Karamba atribuiu ao grupo de elementos “Prumos Inferiores” a secção CHS406.4x40, à qual se correspondeu a família Revit designada “CHS-Circular Hollow Section-Column 406.4x40CHS”. Na figura 5.18, ilustra-se este processo em Grasshopper.

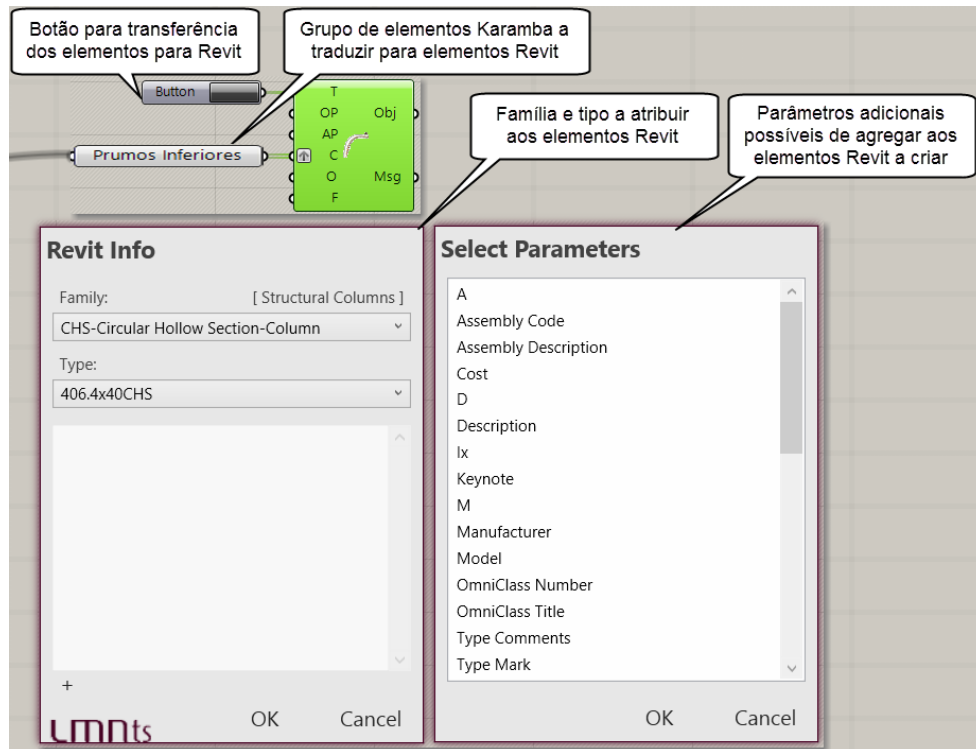


Figura 5.18 – Tradução de elementos Grasshopper em famílias Revit. Caso dos prumos inferiores da solução 7.

Após repetição desta tarefa para todos os grupos de elementos definidos, foi possível transferir o modelo para o Autodesk Revit, sem perder o significado semântico necessário à sua correta implementação em ambiente BIM. Na figura 5.19 mostra-se o modelo transferido com base no método acima descrito. Olhando para a barra lateral esquerda das propriedades, é possível verificar que o prumo inferior, selecionado a azul, tem corretamente atribuída a família definida em Grasshopper, através do *plug-in* Superb Lyrebird.

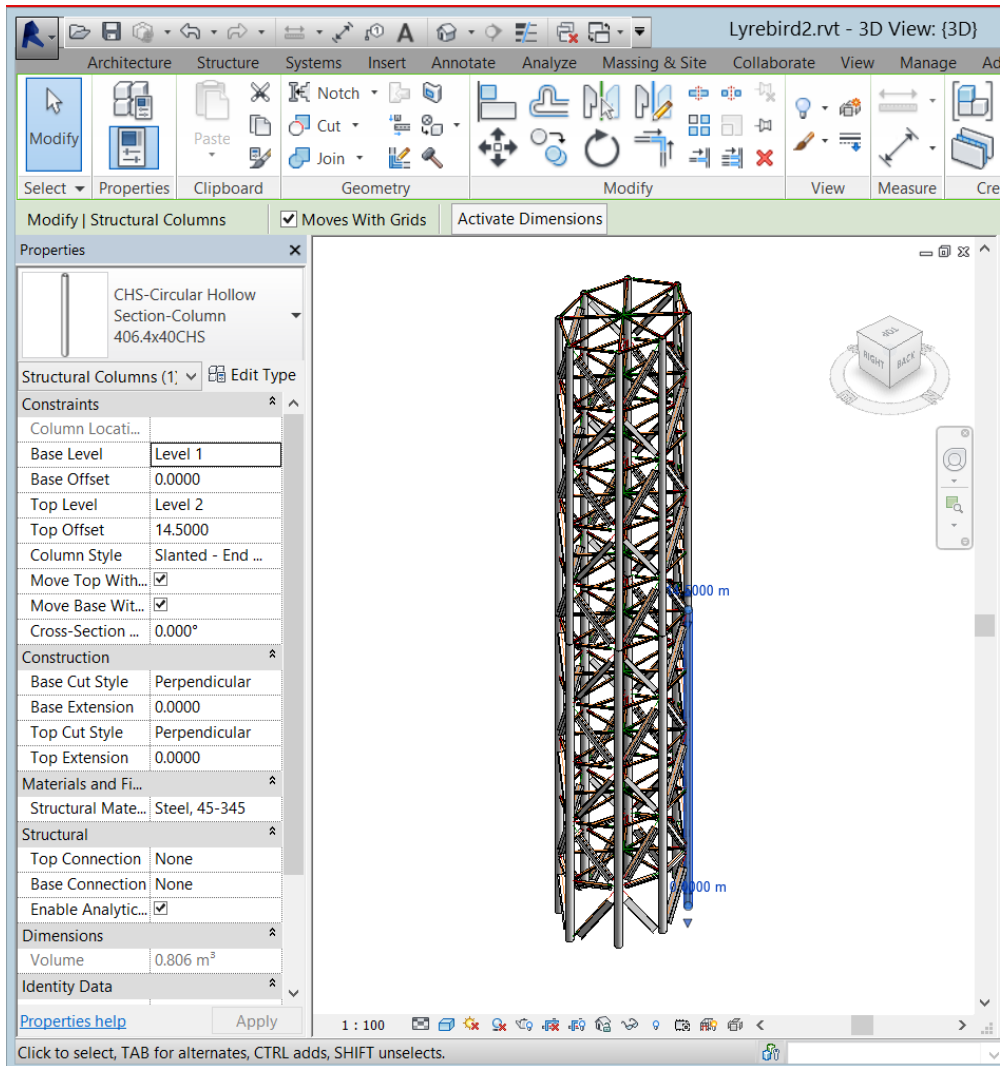


Figura 5.19 – Modelo exportado para Autodesk Revit.

A vertente deste trabalho, e deste caso de estudo em particular, não se prende com a análise estrutural, mas sim com a exploração de ferramentas digitais que a suportem em fases preliminares de projeto. Para um estudo mais completo a este nível, seria necessário considerar condições de dimensionamento adicionais e mais rigorosas, tais como a consideração simultânea de vários casos de carga, que o Karamba permite.

Ainda assim, os resultados obtidos neste caso de estudo, embora não representem as condições de projeto necessárias ao correto dimensionamento, permitem abordar a estrutura como um processo gerativo. Desta forma foi possível definir critérios objetivos de desempenho que guiaram o processo de formação do modelo, retornando diversas opções otimizadas, permitindo à equipa de projeto ponderar acerca de diversas opções válidas.

Como já referido, a metodologia aqui explorada pretende ser um suporte à decisão durante as fases preliminares de projeto. É nesta fase que deve haver lugar à exploração de diversas soluções, uma vez que uma má opção tomada nesta fase, dificilmente poderá ser compensada nas fases posteriores, ou pelo menos, acarretará grandes prejuízos a todo o processo. Desta forma, neste caso de estudo, o projetista tem ao seu alcance um processo de prototipagem para o estudo de diversas soluções para que possa

ponderar, em conjunto com a restante equipa de projeto, no sentido de optar por aquela que melhor de encaixe no âmbito geral do projeto. Tendo já uma base objetiva do desempenho estrutural, é possível, nas fase posteriores, conduzir uma análise mais detalhada e completa da estrutura, utilizando *softwares* FEM mais completos, e centralizando todo o modelo em ambiente BIM. A transferência para ambiente BIM, embora obrigue ainda a um processo manual, possibilita já manter o significado semântico do modelo que é bastante importante em termos de ganhos de produtividade neste *workflow*. Com os avanços nas ferramentas de interoperabilidade, espera-se que num futuro recente haja melhorias na comunicação entre todas as ferramentas envolvidas, eliminando as lacunas identificadas neste trabalho.

6 CONCLUSÃO

6.1. CONCLUSÕES GERAIS

Analisado todo o trabalho desenvolvido, apresentam-se agora conclusões globais e comentários finais que se considerem importantes, focando o objetivo principal deste trabalho.

Com a viragem do milénio, as preocupações ambientais, de sustentabilidade e do desempenho dos edifícios têm sido cada vez mais imperativos de projeto. A par disto, o setor começou também a perceber o potencial dos imensos recursos computacionais disponíveis na satisfação das crescentes exigências e complexidades que os projetos apresentam hoje em dia. Neste contexto, os profissionais começaram a perceber as oportunidades de inovação que se impunham ao setor, tanto ao nível de processos de projeto, como de aproveitamento dos recursos computacionais disponíveis.

Este trabalho propôs uma metodologia e ferramentas digitais de suporte para o projeto multidisciplinar orientado pelo desempenho. Abordou-se a necessidade de alargar as avaliações de desempenho consideradas na fase concetual, com a inclusão de critérios de desempenho do domínio da engenharia em combinação com aspetos relacionados com a arquitetura. O envolvimento de avaliações numéricas objetivas em conjugação com os aspetos arquitetónicos (geralmente de difícil objetivação) potencia o sucesso do projeto logo desde a sua idealização. Foi salientada a importância da formação geométrica neste processo, tendo-se apresentado a modelação paramétrica como a base para definição geométrica, devido ao seu potencial e flexibilidade para explorar automaticamente diversas alternativas.

A metodologia POD permite a integração de diversos critérios de desempenho ao longo da fase concetual de projeto, que conduzem a geração de alternativas. A integração de técnicas de otimização em conjunto com critérios de desempenho permite gerar soluções de desempenho otimizado, apoiando a equipa de projeto na tomada de decisão. A exploração do projeto é também reforçada pelas características interativas e intuitivas das ferramentas utilizadas, possibilitando facilmente rever, alterar, ou explorar novas direções de projeto.

O primeiro aspeto que se pretendeu evidenciar com a metodologia POD, foi a importância da consideração de alternativas de projeto e a necessidade em melhorar a sua geração. Os exemplos deste trabalho pretenderam evidenciar o papel da modelação paramétrica aliada à programação visual para alcançar isto. O processo tradicional de projeto tem falta de fases de divergência no estado de projeto (subcapítulo 2.2), onde há lugar à exploração de alternativas, muito devido a restrições de tempo. A este respeito, pode-se arguir que o esforço adicional necessário ao processo de parametrização de um modelo contrabalança o tempo ganho com a geração automática de alternativas de projeto. Esta avaliação deve ser tida em consideração na sua aplicação prática. Contudo, os casos práticos realizados neste trabalho demonstraram também a possibilidade de generalização e adaptação dos *scripts* a outros modelos e, portanto, a sua aplicabilidade não se restringe a cada caso em particular. Este fato sugere que, com

alguns ajustes e adaptações, é possível reutilizar os *scripts* em outros projetos, levando a ganhos de produtividade no futuro. A flexibilidade e abrangência da modelação paramétrica possibilitam também que se promova a criação de bibliotecas de objetos paramétricos customizáveis, contendo modelos ou partes destes, cujos *scripts* se adaptam e se interligam facilmente num novo protótipo digital.

A possibilidade de agregar técnicas de otimização a estes modelos paramétricos possibilita também a sua exploração numa lógica de procura de soluções melhoradas/otimizadas. A função do projetista, inserida metodologia POD, durante o processo de geração, exploração e otimização do projeto tem grande relevância. O projetista desempenha um papel chave ao longo de todo o processo, uma vez que é ele que decide e influencia a direção da exploração do modelo, utilizando critérios de desempenho como premissas orientadoras. Assim, os resultados obtidos são altamente dependentes da formalização e interpretação do protótipo, por parte do projetista.

Com a realização dos casos práticos, e em particular o caso de estudo, foi possível constatar que a exploração de projeto é potenciada pelas capacidades de visualização de resultados permitidas pelas ferramentas. A capacidade para visualizar, pesquisar ou listar soluções de acordo com diferentes critérios, facilita a revelação de novas direções de projeto; a comparação entre alternativas; um melhor entendimento acerca da relação entre a geometria e o seu desempenho; e compreender melhor que fatores mais influenciam o desempenho de cada solução. O processo colaborativo é fundamental desde a fase inicial de construção do modelo, de modo a albergar a avaliação multidisciplinar. A escolha de um processo de parametrização apropriado a cada caso é fundamental para promover a interligação entre as propriedades geométricas e os critérios de desempenho definidos. Escolher a estratégia de modelação mais apropriada por vezes é difícil, no entanto, a flexibilidade permitida por estas ferramentas facilita o processo criativo, favorecendo *feedbacks* imediatos que possibilitam ajustes e exploração de caminhos alternativos.

O caso de estudo serviu para demonstrar a aplicabilidade prática da metodologia POD, assim como a utilização das ferramentas que a suportam. Tendo como princípio a construção estratégica do protótipo digital, foi possível manipula-lo, com base em análises de desempenho, que por sua vez alimentaram o processo evolutivo de otimização. Assim, gerou-se um conjunto de soluções que satisfazem simultaneamente os vários critérios de desempenho predefinidos. Este processo sugere à equipa de projeto novas formas de modelar, analisar e explorar a fase de conceitualização do projeto, cujas decisões têm a capacidade para impactar positivamente no restante processo e, conseqüentemente, no ciclo de vida dos edifícios construídos.

O caso de estudo evidenciou dificuldades no processo de interoperabilidade com ferramentas BIM. Este processo deve, de fato, ser alvo de melhorias futuras. Ainda assim, foi possível contornar o problema com uma solução, ainda que mais trabalhosa, possibilitou criar com sucesso uma rotina de interoperabilidade. Neste caso de estudo foram exploradas apenas uma parte das potencialidades da metodologia POD. Esta pode ser aplicada a outros tipos de análise de desempenho, que têm sido alvo de investigação na literatura da especialidade, como por exemplo (Aksamija, A. [et al.], 2011) e (Gerber, D.J. [et al.], 2012). As plataformas abertas em que estas ferramentas assentam têm feito surgir novas ferramentas, nos mais diversos domínios e cada vez mais eficazes, que permitem augurar desenvolvimentos promissores nesta área.

De forma a avaliar mais detalhadamente a metodologia apresentada, bem como as ferramentas digitais que a suportam, é necessário contextualiza-la num âmbito mais alargado das práticas dentro do setor. Existe também a necessidade de explorar mais aprofundadamente os obstáculos relacionados com a interoperabilidade entre *softwares*.

A metodologia proposta neste trabalho requer um relevante investimento de tempo e uma colaboração multidisciplinar logo na fase embrionária do projeto, mas especialmente requer a mudança no modo como o processo de projeto é concebido. Isto engloba não só os profissionais, mas também a indústria de *software*. Esta última necessita de concentrar esforços em melhorar a interoperabilidade entre ferramentas, e em disponibilizar mais ferramentas de análise e otimização que se integrem nas fases concetuais de projeto. A possibilidade das ferramentas de simulação para obter resultados confiáveis, ainda que não detalhados, com inserção de pouca informação à partida favoreceria a integração de análises de desempenho logo nas fases concetuais, como é exemplo o *plug-in* Karamba. A disponibilização de mais ferramentas do género, alargadas a outros domínios, não está ainda completamente realizada e, portanto, tem um grande potencial de exploração. Desta forma, a integração da modelação paramétrica, análise multidisciplinar de desempenho, otimização de projetos desde a fase concetual, e posterior centralização em ambiente BIM seria reforçada, potenciando melhores práticas dentro da AEC. Em suma, a metodologia POD pretende ir ao encontro dos novos desafios que o setor enfrenta no setor XXI, potenciando edifícios de desempenho melhorado, mais sustentáveis e ambientalmente conscientes.

6.2. DESAFIOS FUTUROS

Após a conclusão deste trabalho reconhece-se que a exploração de processos integrados de projeto orientado pelo desempenho tem ainda um grande potencial de inovação. As potencialidades para, de forma integrada, gerar, ensaiar, analisar e otimizar diversas soluções de projeto antes de partir para a sua produção final são ainda uma prática sem expressão dentro do setor. A ideia de protótipo digital, ao contrário de outras indústrias, só agora está a começar a ser explorada na IC. Alguns dos desafios futuros nesta área são:

- Desenvolver métodos de interoperabilidade mais eficazes entre as ferramentas de prototipagem digital e as ferramentas BIM. A dificuldade para transportar e conservar o significado semântico dos elementos geométricos entre plataformas apresenta ainda algumas lacunas, como discutido em 5.4
- Alargar as possibilidades de interoperabilidade à generalidade das ferramentas utilizadas na AEC, possibilitando que diversas ferramentas coexistam e contribuam positivamente para melhores práticas dentro do setor.
- Investigação do potencial de criação de bibliotecas de elementos parametrizados que podem ser reutilizados e conciliados em diversos contextos de projeto, reduzindo o esforço adicional necessário à criação de protótipos digitais.
- Exploração da integração de capacidades de computação em *cloud* na metodologia proposta, contribuindo para alargar os horizontes do trabalho colaborativo.
- A interligação de ferramentas de análise de desempenho mais rigorosas (como o Autodesk Robot Structural Analysis), com ferramentas de modelação paramétrica e programação visual, de modo a permitir análises mais detalhadas, contornando algumas limitações e simplificações dos seus *plug-ins* (como foi exemplo o Karamba).

BIBLIOGRAFIA

- Ahlquist, Sean; Menges, Achim - Introduction—computational design thinking. *Computational Design Thinking*. (2011). p. 10-29.
- Aish, Robert; Woodbury, Robert - Multi-level interaction in parametric design. Springer, 2005. 3540281797
- Aksamija, Ajla; Guttman, Mario; Rangarajan, Haripriya; Meador, Tim - Parametric Control of BIM Elements for Sustainable Design in Revit: Linking Design and Analytical Software Applications through Customization. *Perkins+ Will research journal*. Vol. 3. n.º 1 (2011). p. 32-45.
- AlvaroSizaVieira.com - Quinta da Malagueira (1977). (2009). Consult. em Fevereiro 2014. Disponível em WWW: <<http://alvarosizavieira.com/1977-quinta-da-malagueira>>.
- Architecture, Dominique Perrault - Dominique Perrault Architecture - Piazza Garibaldi. (2004). Consult. em Maio 2014. Disponível em WWW: <http://www.perraultarchitecte.com/en/projects/2497-piazza_garibaldi.html>.
- Baker, James E - Reducing bias and inefficiency in the selection algorithm. L. Erlbaum Associates Inc., 1987. 0805801588
- Bernard, Murrye - Case Study: Zaha Hadid Architects' Riverside Museum of Transport and Travel. 2012. Disponível em WWW: <<http://buildipedia.com/aec-pros/engineering-news/case-study-zaha-hadid-architects-riverside-museum-of-transport-and-travel-part-5>>.
- Blum, Christian; Roli, Andrea - Metaheuristics in combinatorial optimization: Overview and conceptual comparison. *ACM Computing Surveys (CSUR)*. Vol. 35. n.º 3 (2003). p. 268-308. 0360-0300
- Boeykens, Stefan - Bridging building information modeling and parametric design. *eWork and eBusiness in Architecture, Engineering and Construction: ECPPM 2012*. (2012). p. 453. 0203077962
- Bollinger, Klaus; Grohmann, Manfred; Tessman, Oliver - Form, Force, Performance: Multi-Parametric Structural Design. *Architectural Design*. Vol. 78. n.º 2 (2008). p. 20-25. 1554-2769
- Bryde, David; Broquetas, Martí; Volm, Jürgen Marc - The project benefits of Building Information Modelling (BIM). *International Journal of Project Management*. Vol. 31. n.º 7 (2013). p. 971-980. Disponível em WWW: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263786312001779>>. 0263-7863
- Chilton, John - Heinz Isler's Infinite Spectrum: Form-Finding in Design. *Architectural Design*. Vol. 80. n.º 4 (2010). p. 64-71. Disponível em WWW: <<http://dx.doi.org/10.1002/ad.1108>>. 1554-2769
- Christensen, C.; Anderson, R.; Horowitz, S.; Courtney, A.; Spencer, J. - BEopt(TM) Software for Building Energy Optimization: Features and Capabilities. 2006. Disponível em WWW: <<http://www.osti.gov/scitech//servlets/purl/891598-I42wR8/>>.
- Darke, Jane - The primary generator and the design process. *Design studies*. Vol. 1. n.º 1 (1979). p. 36-44. 0142-694X
- Davis, Daniel; Peters, Brady - Design Ecosystems: Customising the Architectural Design Environment with Software Plug-ins. *Architectural Design*. Vol. 83. n.º 2 (2013). p. 124-131. Disponível em WWW: <<http://dx.doi.org/10.1002/ad.1567>>. 1554-2769
- Dimic, Milos - Structural optimization of grid shells based on genetic algorithms. (2011).

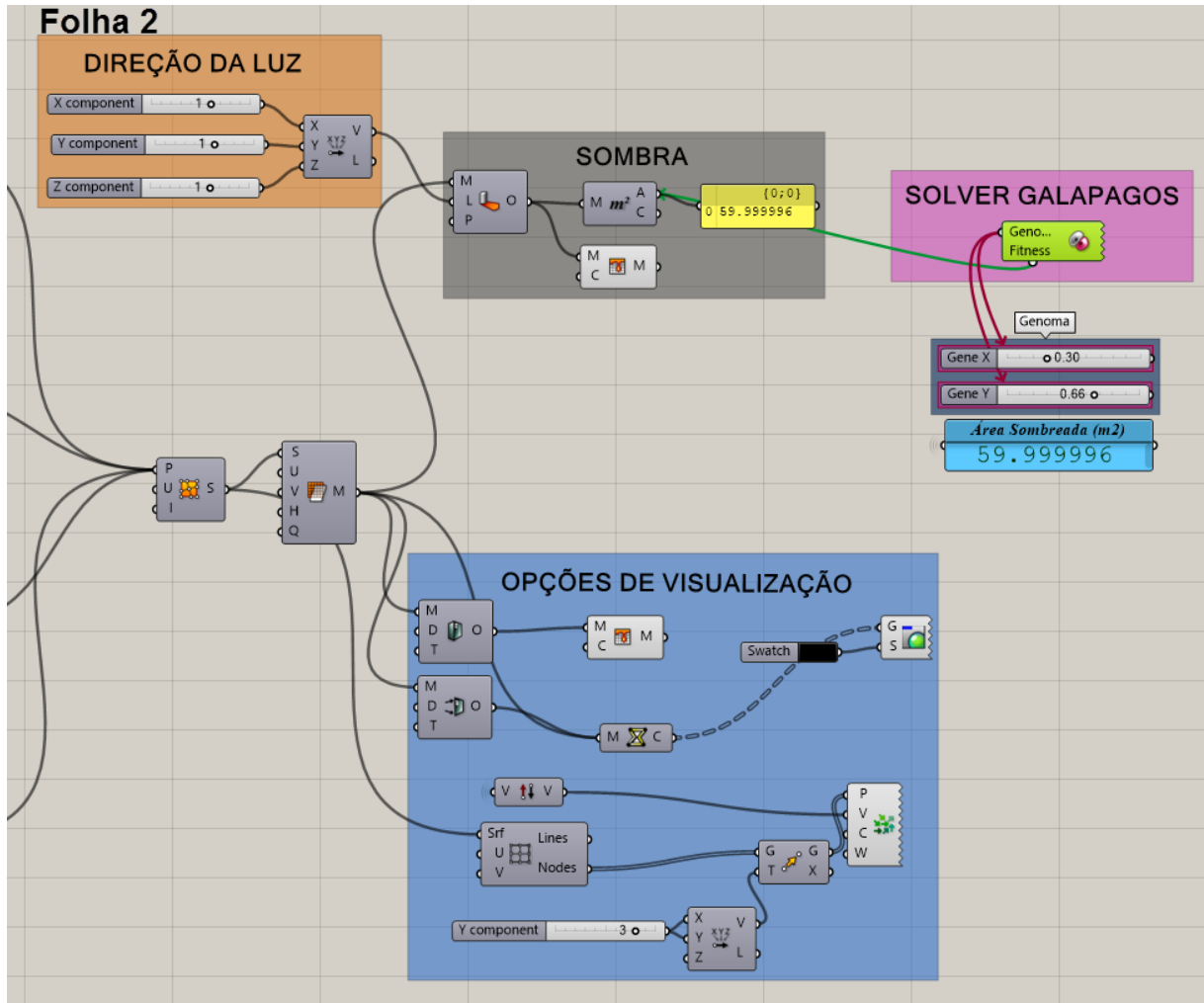
- Dino, İpek Gürsel - Creative Design Exploration by Parametric Generative Systems in Architecture. *Metu Jfa*. Vol. 1. (2012). p. 207.
- Dorigo, M.; Gambardella, L. M. - Ant colony system: a cooperative learning approach to the traveling salesman problem. *Evolutionary Computation, IEEE Transactions on*. Vol. 1. n.º 1 (1997). p. 53-66. 1089-778X
- Duarte, José Pinto - Customizing mass housing: a discursive grammar for Siza's Malagueira houses. Massachusetts Institute of Technology, 2001.
- Eastman, C.; Teicholz, P.; Sacks, R.; Liston, K. - BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers and Contractors. Wiley, 2011. Disponível em WWW: <<http://books.google.pt/books?id=aCi7Ozwkoj0C>>. 9781118021699
- Esteco - modeFrontier - Esteco. n.º Março 2014 (2014). Consult. em Março 2014. Disponível em WWW: <<http://www.esteco.com/modefrontier>>.
- Fischer, Martin - Intelligent Computing in Engineering and Architecture. Springer, 2006. - Formalizing construction knowledge for concurrent performance-based design. 3540462465
- Flager, Forest; Haymaker, John - A comparison of multidisciplinary design, analysis and optimization processes in the building construction and aerospace industries. Citeseer, 2007.
- Fleming, P. J.; Purshouse, R. C. - Evolutionary algorithms in control systems engineering: a survey. *Control Engineering Practice*. Vol. 10. n.º 11 (2002). p. 1223-1241. Disponível em WWW: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0967066102000813>>. 0967-0661
- Flory, Simon - Goat: Optimization Solver Component for Rhino's Grasshopper. (2013). Disponível em WWW: <<http://www.rechenraum.com/en/goat/overview.html>>.
- Gerber, David Jason; Lin, Shih-Hsin Eve; Pan, Bei Penny; Solmaz, Aslihan Senel - Design optioneering: Multi-disciplinary design optimization through parameterization, domain integration and automation of a genetic algorithm. Society for Computer Simulation International, 2012. 1618397907
- Goldberg, David E; Deb, Kalyanmoy - A comparative analysis of selection schemes used in genetic algorithms. *Urbana*. Vol. 51. (1991). p. 61801-2996.
- Goldberg, DE - Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning. Addison-Wesley, Reading, MA, 1989.
- Gonzalez, Andrea - London City Hall. 2011. Disponível em WWW: <<http://aedesign.files.wordpress.com/2010/06/london-city-hall-andrea-gonzalez1.pdf>>.
- Grasshopper3d - Grasshopper3d - Octopus Group. (2013). Consult. em Abril 2014. Disponível em WWW: <<http://www.grasshopper3d.com/group/octopus>>.
- Grilo, António; Jardim-Goncalves, Ricardo - Value proposition on interoperability of BIM and collaborative working environments. *Automation in Construction*. Vol. 19. n.º 5 (2010). p. 522-530. Disponível em WWW: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926580509001733>>. 0926-5805
- Grohmann, Bollinger - Stazione Metropolitana Linea 1. 2014. Disponível em WWW: <<http://www.bollinger-grohmann.com/en.projects.stazione-metropolitana-linea-1.html?f=current>>.
- Hanna, Sean - Levels of uncertainty in design. (2013). Consult. em Abril 2014. Disponível em WWW: <http://smartgeometry.org/index.php?option=com_content&view=article&id=232%3Alevels-of-uncertainty-in-design&catid=45%3Aarticles&Itemid=151>.

- Heaton, Jeff - Understanding Simulated Annealing, Heaton Research. (2014). Consult. em Maio, 2014. Disponível em WWW: <<http://www.heatonresearch.com/node/727>>.
- Helbig, Thorsten; Scheible, Florian; Kamp, Florian; Schieber, Roman - Engineering in a computational design environment – New Terminal 3 at Shenzhen Bao’an International Airport, China. *Steel Construction*. Vol. 7. n.º 1 (2014). p. 24-31. Disponível em WWW: <<http://dx.doi.org/10.1002/stco.201420014>>. 1867-0539
- Holland, John H - Adaptation in natural and artificial systems: An introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence. U Michigan Press, 1975. 0472084607
- Holzer, Dominik; Downing, Steven - Optioneering: A New Basis for Engagement Between Architects and Their Collaborators. *Architectural Design*. Vol. 80. n.º 4 (2010). p. 60-63. Disponível em WWW: <<http://dx.doi.org/10.1002/ad.1107>>. 1554-2769
- Horn, Jeffrey; Goldberg, David E - Genetic algorithm difficulty and the modality of fitness landscapes. Citeseer, 1994.
- Kalay, Yehuda E - Performance-based design. *Automation in construction*. Vol. 8. n.º 4 (1999). p. 395-409. 0926-5805
- Kirkpatrick, Scott; Vecchi, MP - Optimization by simulated annealing. *science*. Vol. 220. n.º 4598 (1983). p. 671-680. 0036-8075
- Knippers, Jan - From Model Thinking to Process Design. *Architectural Design*. Vol. 83. n.º 2 (2013). p. 74-81. Disponível em WWW: <<http://dx.doi.org/10.1002/ad.1558>>. 1554-2769
- Kolarevic, Branco - Computing the performative in architecture. 2003a.
- Kolarevic, Branko - Designing and manufacturing architecture in the digital age. *Architectural information management*. (2001).
- Kolarevic, Branko - Architecture in the digital age: design and manufacturing. Taylor & Francis, 2003b. 1134470444
- Leach, Neil - Digital Morphogenesis. *Architectural Design*. Vol. 79. n.º 1 (2009). p. 32-37. Disponível em WWW: <<http://dx.doi.org/10.1002/ad.806>>. 1554-2769
- Logan, Tim - Superb Lyrebird | LMNts. (2014). Consult. em Junho 2014. Disponível em WWW: <<http://lmnts.lmnarchitects.com/bim/superb-lyrebird/>>.
- Machairas, Vasileios; Tsangrassoulis, Aris; Axarli, Kleo - Algorithms for optimization of building design: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 31. n.º 0 (2014). p. 101-112. Disponível em WWW: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032113007855>>. 1364-0321
- Mangelsdorf, Wolf - Structuring Strategies for Complex Geometries. *Architectural Design*. Vol. 80. n.º 4 (2010). p. 40-45. Disponível em WWW: <<http://dx.doi.org/10.1002/ad.1104>>. 1554-2769
- Marsh, Laurence; Flanagan, Roger - Measuring the costs and benefits of information technology in construction. *Engineering Construction and Architectural Management*. Vol. 7. n.º 4 (2000). p. 423-435. 1365-232X
- Marshall, Brain - HowStuffWorks. (2001). Disponível em WWW: <<http://science.howstuffworks.com/life/genetic/gene-pool.htm>>.

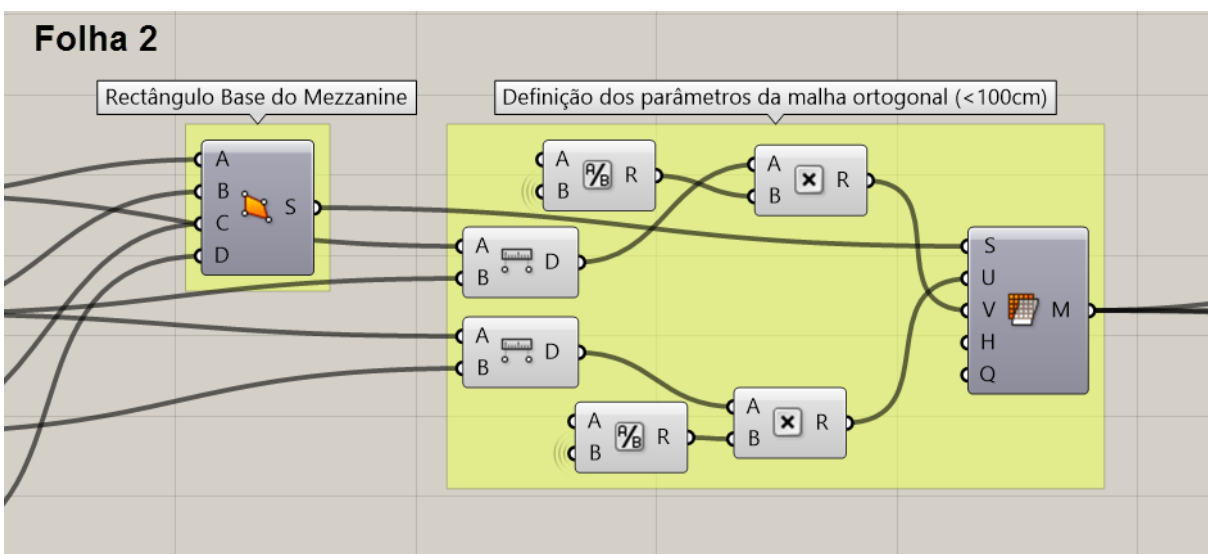
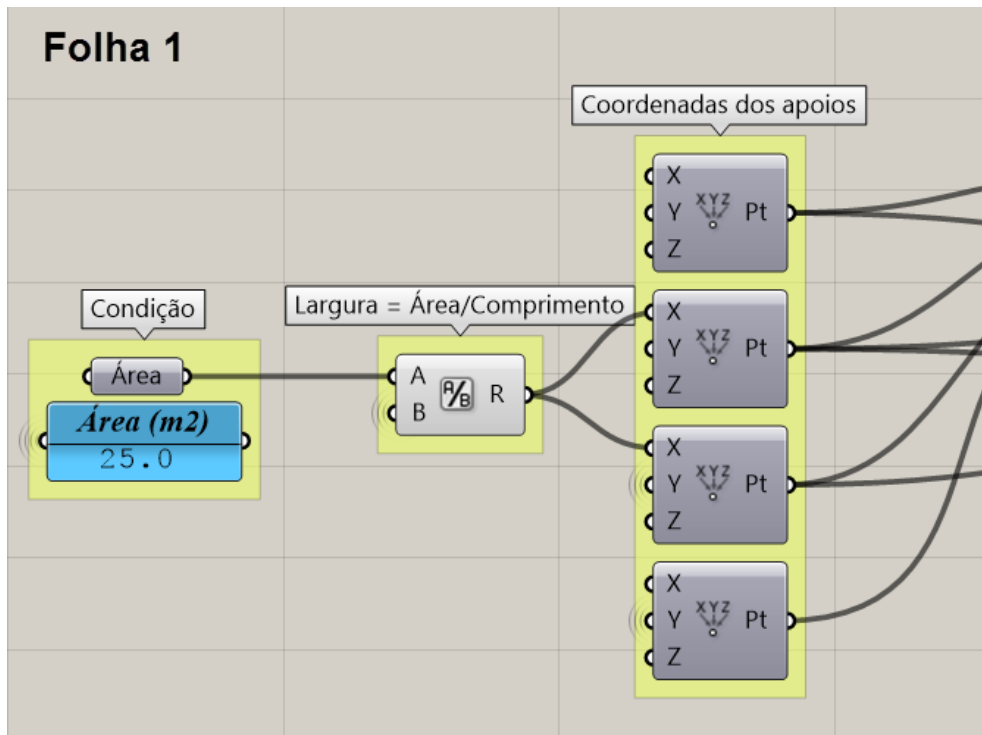
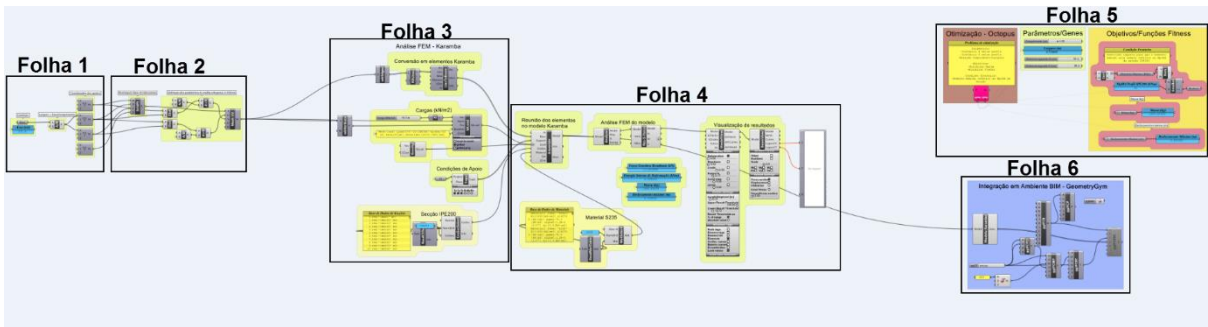
- Mathematics, Encyclopedia of - Phase space. (2014). Consult. em Fevereiro 2014. Disponível em WWW: <http://www.encyclopediaofmath.org/index.php/Phase_space>.
- Mathworks - MATLAB - The Language of Technical Computing. (2014). Consult. em Março 2014. Disponível em WWW: <<http://www.mathworks.com/products/matlab/>>.
- Miller, Nathan - Computer Applications in Design: UNL Arch 223. 2013. Disponível em WWW: <<http://wiki.theprovingground.org/unl-arch223-lectures#toc0>>.
- Mirtschin, Jonathan - Engaging generative BIM workflows. *Collaborative Design of Lightweight Structures-LSAA 2011*. (2011). p. 1-8.
- Owens, Alvin J; Walsh, Michael J; Fogel, Lawrence J - Artificial intelligence through simulated evolution. 1966.
- Oxman, Rivka - Performative design: a performance-based model of digital architectural design. *Environment and planning. B, Planning & design*. Vol. 36. n.º 6 (2009). p. 1026. 0265-8135
- Oxman, Rivka; Hammer, Roey; Ben Ari, S - Performative design in architecture. *Predicting the Futures, ECAADE07, Frankfurt*. (2007). p. 227-234.
- Oxman, Rivka; Oxman, Robert - New Structuralism: Design, Engineering and Architectural Technologies. *Architectural Design*. Vol. 80. n.º 4 (2010). p. 14-23. Disponível em WWW: <<http://dx.doi.org/10.1002/ad.1101>>. 1554-2769
- Panoramio - Multihalle. n.º Fevereiro 2014 (2009). Consult. em Fevereiro 2014. Disponível em WWW: <<http://www.panoramio.com/photo/36599877>>.
- Peters, Brady - Computation Works: The Building of Algorithmic Thought. *Architectural Design*. Vol. 83. n.º 2 (2013). p. 8-15. Disponível em WWW: <<http://dx.doi.org/10.1002/ad.1545>>. 1554-2769
- Pinho, Sérgio - O modelo IFC como agente de interoperabilidade Aplicação ao domínio das estruturas. Porto:: FEUP, 2013.
- Portella, Felipe - Hill Climbing with Simulated Annealing. (2014). Consult. em Março 2014. Disponível em WWW: <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/d5/Hill_Climbing_with_Simulated_Annealing.gif>.
- Pottmann, Helmut - Architectural Geometry as Design Knowledge. *Architectural Design*. Vol. 80. n.º 4 (2010). p. 72-77. Disponível em WWW: <<http://dx.doi.org/10.1002/ad.1109>>. 1554-2769
- Preisinger, Clemens - Linking Structure and Parametric Geometry. *Architectural Design*. Vol. 83. n.º 2 (2013). p. 110-113. Disponível em WWW: <<http://dx.doi.org/10.1002/ad.1564>>. 1554-2769
- Preisinger, Clemens - Karamba - Parametric Structural Modeling - User Manual for version 1.0.5. (2014).
- Rittel, Horst WJ; Webber, Melvin M - Dilemmas in a general theory of planning. *Policy sciences*. Vol. 4. n.º 2 (1973). p. 155-169. 0032-2687
- Rutten, David - Evolutionary Principles applied to Problem Solving. Vol. 2014. (2010). Disponível em WWW: <<http://www.grasshopper3d.com/profiles/blogs/evolutionary-principles>>.
- Rutten, David - Galapagos: On the Logic and Limitations of Generic Solvers. *Architectural Design*. Vol. 83. n.º 2 (2013). p. 132-135. Disponível em WWW: <<http://dx.doi.org/10.1002/ad.1568>>. 1554-2769

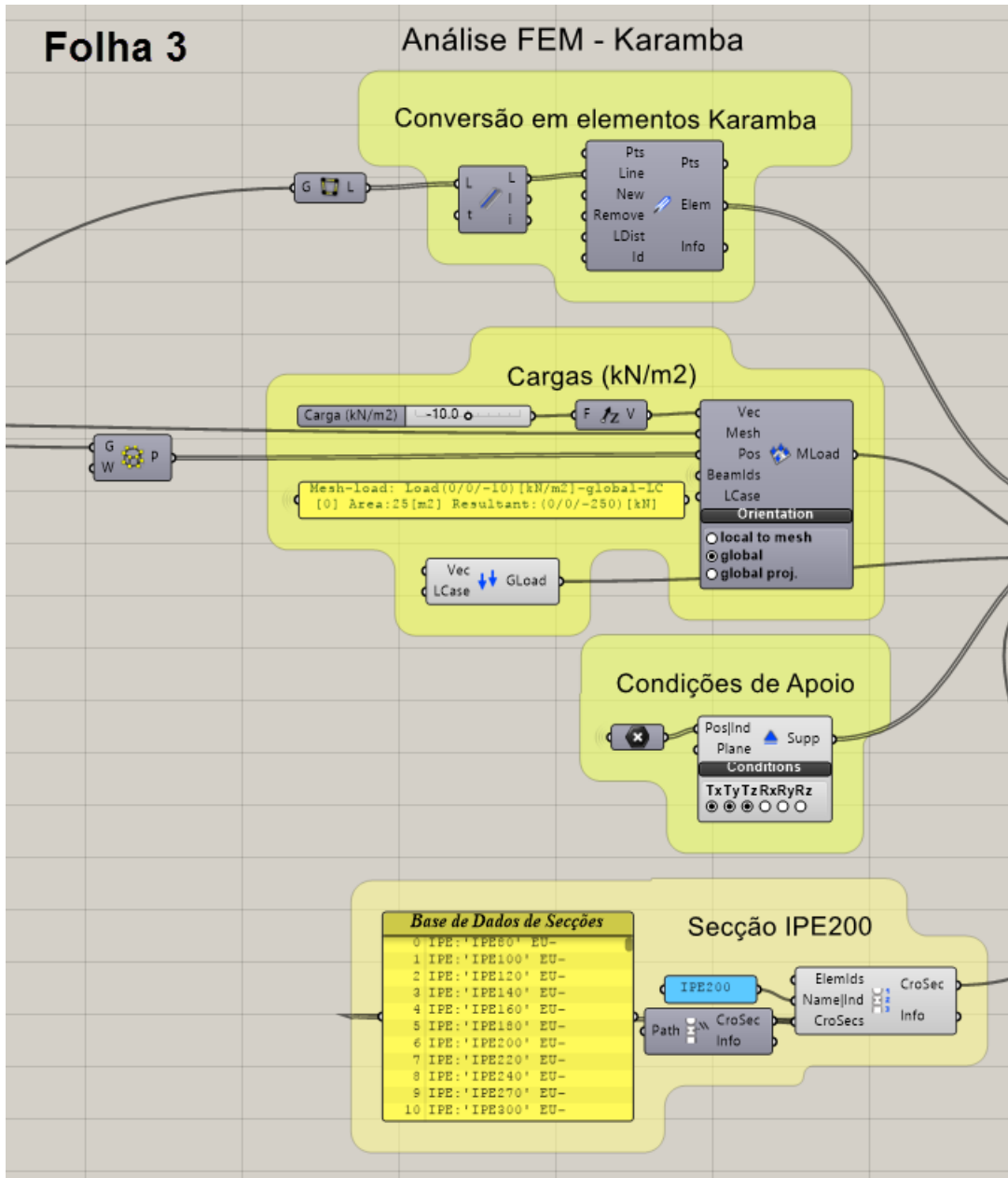
- Saridakis, Kostas M; Dentsoras, Argiris J - Integration of fuzzy logic, genetic algorithms and neural networks in collaborative parametric design. *Advanced Engineering Informatics*. Vol. 20. n.º 4 (2006). p. 379-399. 1474-0346
- sawallpapers.com - Montreal Biosphere. (2012). Consult. em Fevereiro 2014. Disponível em WWW: <<http://www.sawallpapers.com/photo/5420.aspx#.U3O7O1duAj4>>.
- Scheible, Florian - Parametric Engineering Everything is Possible. 2011.
- Scheurer, Fabian - Materialising Complexity. *Architectural Design*. Vol. 80. n.º 4 (2010). p. 86-93. Disponível em WWW: <<http://dx.doi.org/10.1002/ad.1111>>. 1554-2769
- Shea, Kristina; Aish, Robert; Gourtovaia, Marina - Towards integrated performance-driven generative design tools. *Automation in Construction*. Vol. 14. n.º 2 (2005). p. 253-264. 0926-5805
- Shelden, Dennis - Networked Space. *Architectural Design*. Vol. 83. n.º 2 (2013). p. 36-41. Disponível em WWW: <<http://dx.doi.org/10.1002/ad.1551>>. 1554-2769
- Shelden, Dennis Robert - Digital surface representation and the constructibility of Gehry's architecture. Massachusetts Institute of Technology, 2002.
- Shi, Xing; Yang, Wenjie - Performance-driven architectural design and optimization technique from a perspective of architects. *Automation in Construction*. Vol. 32. (2013). p. 125-135. 0926-5805
- Sobek, Werner - Radical Sources of Design Engineering. *Architectural Design*. Vol. 80. n.º 4 (2010). p. 24-33. Disponível em WWW: <<http://dx.doi.org/10.1002/ad.1102>>. 1554-2769
- Studio, Fuksas - Massimiliano Fuksas Architetto - Shenzhen Bao'an International Airport - Terminal 3. (2009). Consult. em Maio 2014. Disponível em WWW: <<http://www.fuksas.it/#/progetti/1405/>>.
- Succar, Bilal - Building information modelling framework: A research and delivery foundation for industry stakeholders. *Automation in Construction*. Vol. 18. n.º 3 (2009). p. 357-375. Disponível em WWW: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926580508001568>>. 0926-5805
- Turrin, Michela; von Buelow, Peter; Stouffs, Rudi - Design explorations of performance driven geometry in architectural design using parametric modeling and genetic algorithms. *Advanced Engineering Informatics*. Vol. 25. n.º 4 (2011). p. 656-675. 1474-0346
- van Berkel, Ben - Navigating the Computational Turn. *Architectural Design*. Vol. 83. n.º 2 (2013). p. 82-87. Disponível em WWW: <<http://dx.doi.org/10.1002/ad.1559>>. 1554-2769
- Wang, Juite - Improved engineering design concept selection using fuzzy sets. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*. Vol. 15. n.º 1 (2002). p. 18-27. 0951-192X
- Wetter, Michael - GenOpt®, " Generic Optimization Program. 2001.
- Woodbury, Robert F; Burrow, Andrew L - Whither design space? AI EDAM. Vol. 20. n.º 2 (2006). p. 63-82.
- Zitzler, Eckart; Laumanns, Marco; Thiele, Lothar - SPEA2: Improving the strength Pareto evolutionary algorithm. (2001).

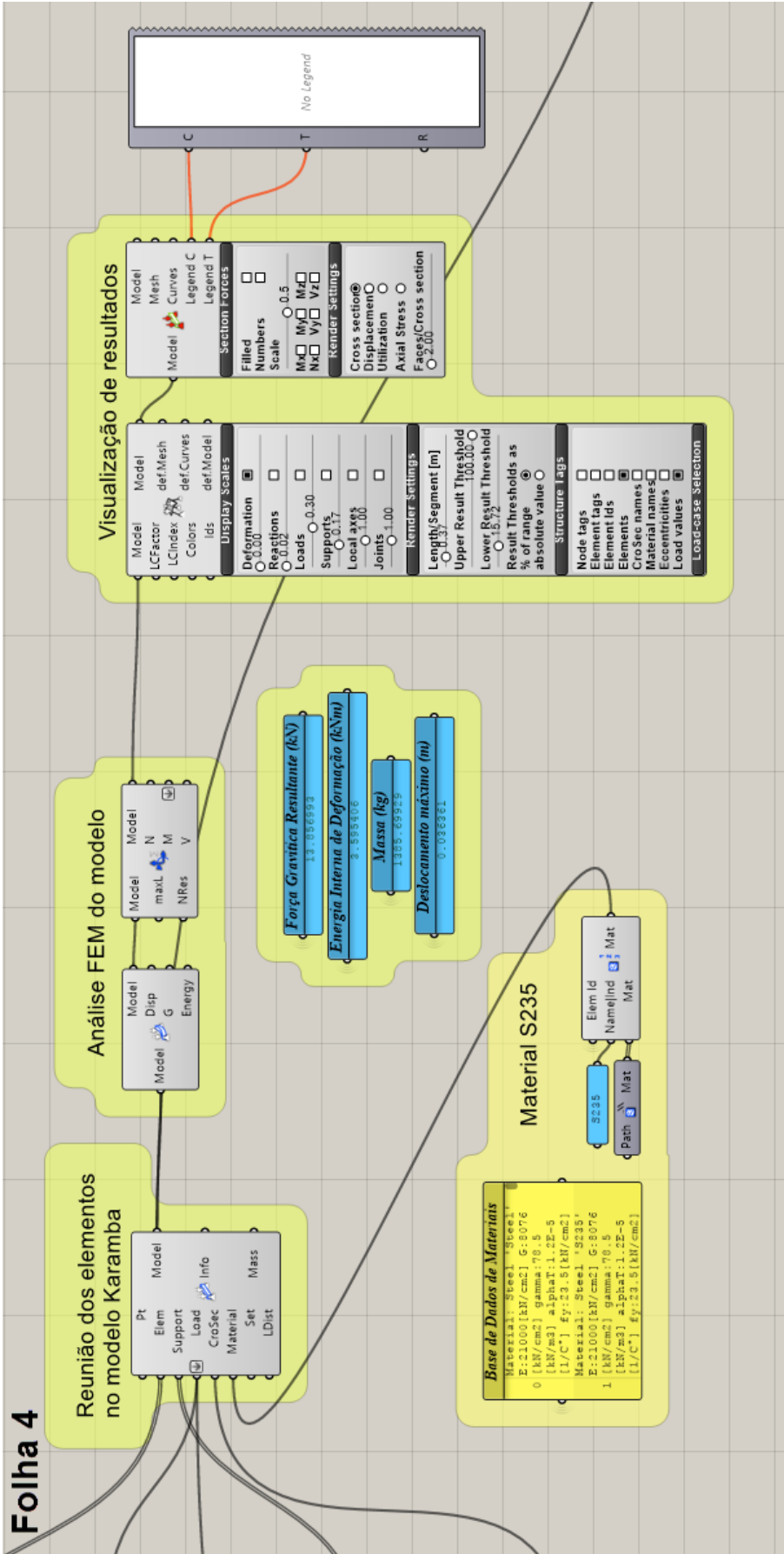
ANEXOS

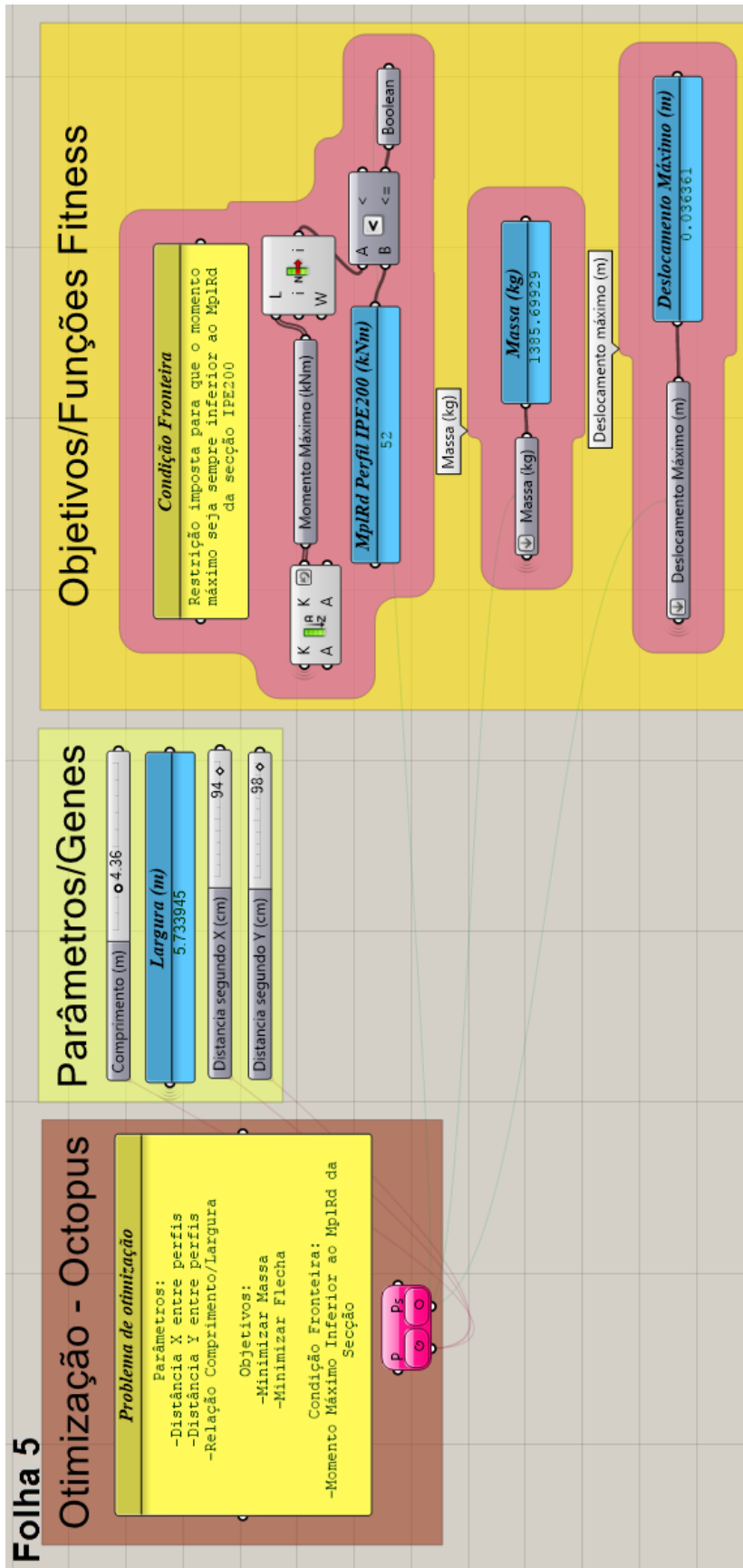


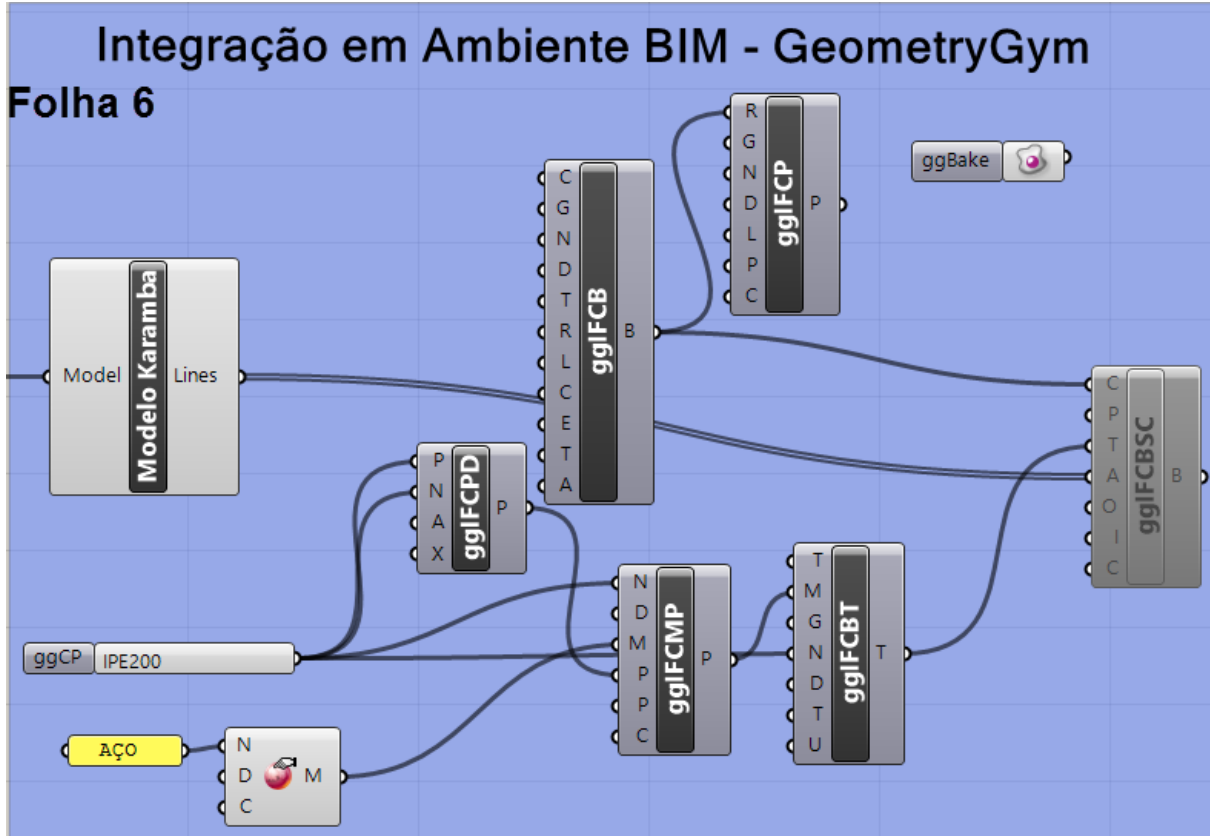
A2. CASO PRÁTICO DE APLICAÇÃO: PROBLEMA 1 E PROBLEMA 2 – DEFINIÇÃO GRASSHOPPER



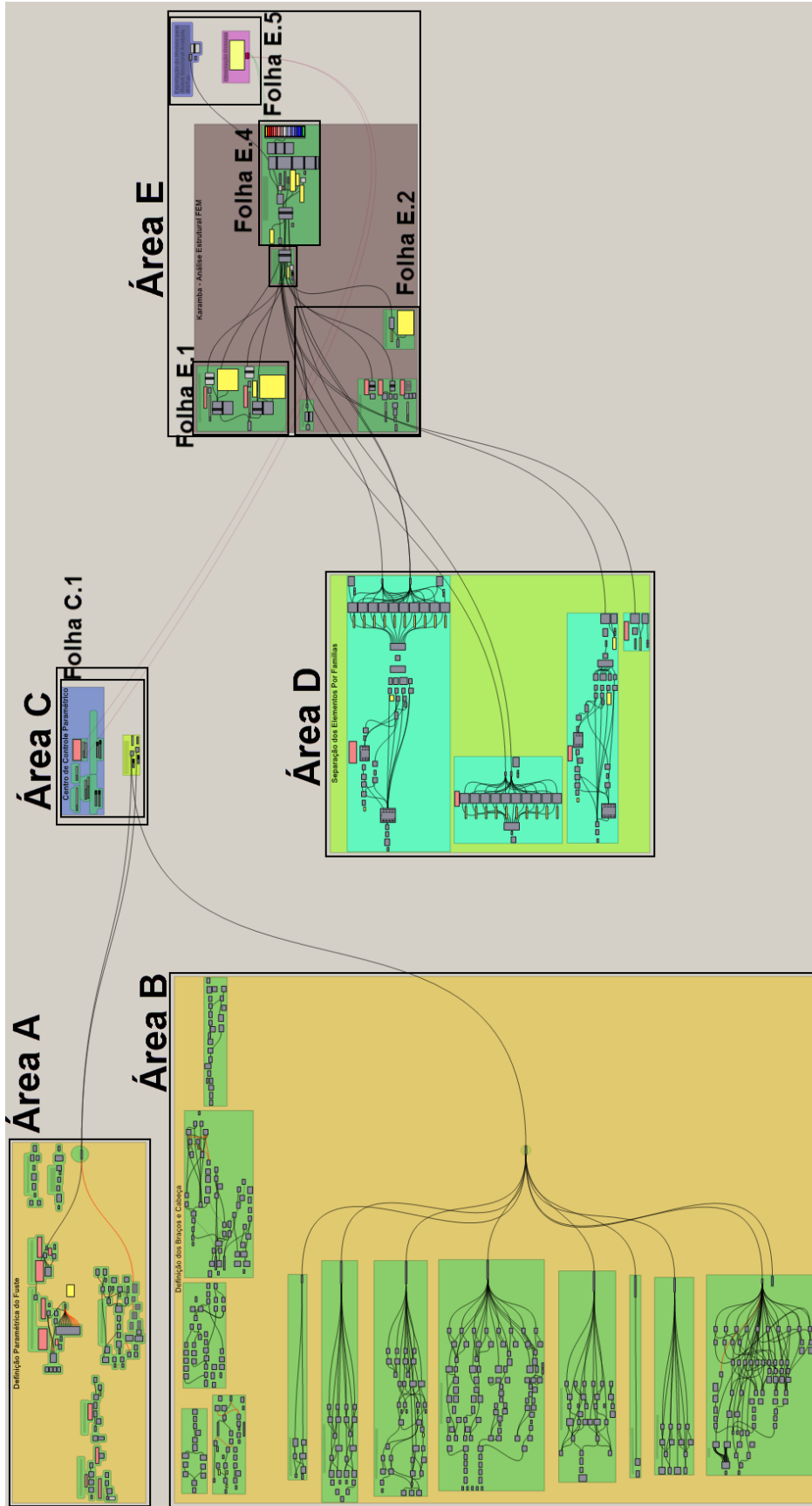








A3. CASO DE ESTUDO – DEFINIÇÃO GRASSHOPPER



Área A – Definição paramétrica do fuste central

Área B – Definição paramétrica dos braços e cabeça

Área C – Centro de controlo paramétrico do modelo e reunião geométrica do modelo

Área D – Agrupamento da geometria em famílias de elementos (conforme disposto no capítulo 5)

Área E – Definição do modelo Karamba e sua análise; Otimização Octopus; Exportação do Modelo

