U.PORTO

FEUP FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO

PROPOSTA METODOLÓGICA PARA A INTEGRAÇÃO DO DESIGN GENERATIVO E DFMA EM PROJETOS DE HABITAÇÕES EVOLUTIVAS E PRÉ-FABRICADAS

GUILHERME GABRIEL PIRES

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de

MESTRE EM PROJETO INTEGRADO NA CONSTRUÇÃO DE EDIFÍCIOS

Orientadora: Professora Doutora Bárbara Rangel Carvalho

OUTUBRO DE 2024

MESTRADO EM PROJETO INTEGRADO NA CONSTRUÇÃO DE EDIFÍCIOS 2022/2024

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ mprince@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 em Projeto Integrado na Construção de Edifícios - 2014/2015 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2015*.

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.

A todos que me deram e dão forças para que eu siga minha jornada.

"Mas é preciso ter manha, é preciso ter graça, é preciso ter sonho, sempre.
Quem traz na pele essa marca possui a estranha mania de ter fé na vida."

Milton Nascimento

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Marina e ao Welington por todo tipo de apoio que me deram, mesmo estando a milhares de quilômetros de distância. Foram providenciais para que eu pudesse enfrentar dignamente essa etapa. Sei que fariam de forma exatamente igual se essa situação se repetisse, acreditam em meu potencial e veem o valor do meu esforço. Agradeço também à Malu, que sempre desejou o meu melhor e me deixa orgulhoso ao ver como se tornou uma pessoa tão comprometida com seus objetivos e afazeres.

Agradeço à Marcela, minha grande parceira em solo lusitano. Nas aventuras, celebramos. Nas desventuras, nos confortamos. É uma pessoa que cresceu muito comigo durante os últimos dois anos, e para sempre me inspirará a ser uma pessoa melhor e um profissional mais dedicado.

Agradeço aos outros familiares, aos familiares não consanguíneos e aos meus amigos: sou imensamente grato por toda a boa energia que emanaram para mim. E quanto aos familiares que já se foram, transmito meu o agradecimento através da tentativa de honrá-los sempre dando o melhor de mim, com bondade, empatia e honestidade.

Deixo também meu agradecimento àqueles que tive o privilégio de conhecer dentro da FEUP: agradeço aos colegas e professores do MPRINCE pelos bons momentos e conhecimentos trocados, aos colegas da digiroom e do LabFTC, à SASUP, aos grandes Prof. Vasco de Freitas e Eng. A. Eduardo Costa. Por fim, deixo um agradecimento especial à minha orientadora Profa. Bárbara Rangel, que no exercício do seu nobre trabalho mostrou-me um mundo de possibilidades – o que faz-me ter grandes expectativas de que meus futuros estudos e projetos possam impactar nossa sociedade da melhor maneira possível.

RESUMO

A construção modular tem vindo a passar por grandes evoluções ao longo das últimas décadas. São cada vez mais os componentes e elementos construtivos produzidos em fábrica, produção essa que ganha cada vez mais qualidade devido à aceleração do desenvolvimento informático (Smith 2010, 18). No entanto, por mais que o cenário se mostre positivo, paradoxalmente ainda se mostra permeado de constrangimentos, seja nos desentendimentos entre os intervenientes em um mesmo projeto (Tajul Ariffin et al. 2019), seja na relutância das empresas em aplicar inovações tecnológicas (Qi et al. 2021). Talvez pela dimensão do produto, que é um edifício, hoje ainda não se consegue explorar todo o potencial da construção industrializada, visto que os projetos ainda enfrentam problemas com tempo, custos e logística (Abd Razak et al. 2022). Esses fatores fazem com que o método tradicional, tido como de baixa eficiência e gerador de grandes volumes de resíduos (Cheng et al. 2023), prevaleça na sociedade. Para alterar esse paradigma, a mudança tem de começar na equipa de projeto e na forma de comunicação com esse novo *player* do sector, a indústria. Para isso, é importante estudar métodos e ferramentas como o DfMA e o Design Generativo para estreitar a relação entre conceção (design), produção e eficácia de obra. Com estas chaves, percebe-se que podem ser abertas portas para a resolução das problemáticas da construção industrializada, e consequentemente impulsionar sua aceitação. Para a validação deste estudo serão apresentados uma proposta metodológica e um gerador de habitações pré-fabricadas, cujo desenvolvimento será feito em um processo de *design* generativo. Almejou-se que o resultado final fosse um compêndio de temas pertinentes à área da construção industrializada, nomeadamente o DfMA, a arquitetura evolutiva, a produção de componentes, o projeto integrado e a arquitetura paramétrica.

PALAVRAS CHAVE: CONSTRUÇÃO PRÉ-FABRICADA, CONSTRUÇÃO MODULAR, HABITAÇÃO EVOLUTIVA, DFMA, *DESIGN* PARAMÉTRICO.

ABSTRACT

The modular construction field has undergone significant evolutions over recent decades. Even more components and construction elements are being produced in factories. That type of production is gaining higher quality due to the acceleration of information technology development (Smith 2010, 18). However, despite this positive outlook, the field remains paradoxically constrained by issues, such as the disagreement between stakeholders in the same project (Tajul Ariffin et al. 2019) or the reluctance of companies to adopt technological innovations (Qi et al. 2021). Perhaps due to the scale of the product—a building — the fully exploiting the potential of industrialized construction is still unachievable today, as projects continue to face challenges related to time, costs, and logistics (Abd Razak et al. 2022). Those factors cause the traditional method of construction, considered inefficient and a large waste generator (Cheng et al. 2023), prevail in society. To change this paradigm, the shift must begin with the project team and the manner of communication with this new sector player: the industry. Therefore, it is crucial to study methods and tools such as DfMA and Generative Design to bridge the gap between design, production, and construction efficiency. With these keys, solutions to the challenges of industrialized construction can be achieved, consequently promoting its acceptance. To validate this study, it will be presented a methodological proposal and a prefabricated housing generator developed through a generative design process. The expectation of the results is to compile pertinent topics in the field of industrialized construction, including DfMA, evolutionary architecture, component production, integrated project delivery and parametric architecture.

KEYWORDS: PREFABRICATED CONSTRUCTION, MODULAR CONSTRUCTION, EVOLUTIONARY ARCHITECTURE, DFMA, PARAMETRIC *DESIGN*.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS i

RESUMO iii

ABSTRACT v

ÍNDICE GERAL vii

ÍNDICE DE FIGURAS xi

ÍNDICE DE TABELAS xvii

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS xix

1. INTRODUÇÃO 1

1.1. MOTIVAÇÕES 2

1.2. QUESTÕES DE PESQUISA 3

1.3. OBJETIVOS 3

2. ESTADO DA ARTE 5

2.1. INTRODUÇÃO 5

2.2. CONCEITOS 5

2.3. REVISÃO BIBLIOMÉTRICA 6

2.3.1. RESULTADOS 7

2.3.2. REFINAMENTOS 8

2.4. DESENVOLVIMENTO DAS TEMÁTICAS 9

2.4.1. HABITAÇÃO EVOLUTIVA 9

2.4.2. CONSTRUÇÃO MODULAR E PRÉ-FABRICADA 20

2.4.3. DFMA 32

2.4.4. DESIGN PARAMÉTRICO 36

2.5. SÍNTESE DAS TEMÁTICAS 39

2.5.1. HABITAÇÃO EVOLUTIVA 39

2.5.2. CONSTRUÇÃO MODULAR E PRÉ-FABRICADA 40

2.5.3. DFMA 40

2.5.4. DESIGN PARAMÉTRICO 41

2.6. PESQUISA DE MERCADO 41

3. CASO DE ESTUDO 47

3.1. INTRODUÇÃO 47

3.2. PERTINÊNCIA DO ESTUDO E ENQUADRAMENTO 47

3.3. OBJETIVOS E RESULTADOS A ALCANÇAR 48

3.4. METODOLOGIA 49

3.5. PLANO EXPERIMENTAL 50

3.6. DESENVOLVIMENTO DA METODOLOGIA 51

3.6.1. INTRODUÇÃO 51

3.6.2. ELABORAÇÃO DA LISTA DE REGRAS DE COMPOSIÇÃO 52

3.6.3. APRESENTAÇÃO DA LISTA DE REGRAS DE COMPOSIÇÃO 63

3.6.4. DESENVOLVIMENTO DA MODELAÇÃO DOS ELEMENTOS 67

3.6.5. INSERÇÃO DOS ELEMENTOS MODELADOS EM SOFTWARE DE DESIGN PARAMÉTRICO 77

3.6.6. CRIAÇÃO DO MODELO PARAMÉTRICO 80

3.6.7. TESTES DE USABILIDADE E VALIDAÇÃO 98

3.7. CONSIDERAÇÕES SOBRE O DESENVOLVIMENTO DO CASO DE ESTUDO 104

4. CONCLUSÃO 109

4.1. RESPOSTA AO PROBLEMA COLOCADO 109

4.2. OBJETIVOS PROPOSTOS E RESULTADOS ALCANÇADOS 109

4.3. RESULTADOS ALCANÇADOS NOS CAPÍTULOS ANTERIORES 111

4.4. CONTRIBUTO PARA O CONHECIMENTO DA TEMÁTICA 114

4.5. CONSTRANGIMENTOS DO PROCESSO 114

4.6. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS 115

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 01 – Expectativa de relação dos temas 7

Fig. 02 – Mapa de interações 9

Fig. 03 – Esquema de evolução da Casa Pátio Romana 11

Fig. 04 – Esquema de evolução da Casa Pátio Chinesa 11

Fig. 05 – Esquema de evolução da Casa Pátio Japonesa 11

Fig. 06 – Modulação da Casa Pátio Japonesa 11

Fig. 07 – Esquema de evolução da Casa Pátio Islâmica 12

Fig. 08 – Plantas esquemáticas da *Das Wachsende Haus* de Walter Gropius 13

Fig. 09 – Plantas esquemáticas da *Small metal house*, de Marcel Breuer 13

Fig. 10 – Vista interna da Casa Pátio de Mies Van der Rohe 14

Fig. 11 – Esquemas da Casa Dominó, de Le Corbusier 14

Fig. 12 – Planta da *Maison Loucheur* de Le Corbusier 15

Fig. 13 – Esquema de evolução da *Maison Loucheur* de Le Corbusier 15

Fig. 14 – Esquema de evolução das *Usonian Houses* (Casa Jacob). 16

Fig. 15 – Patente dos blocos de Frank Lloyd Wright 16

Fig. 16 – Maquete das Casas Expansíveis 16

Fig. 17 – Planta das Casas Expansíveis 16

Fig. 18 – Maquete da "*E.C.C.S. Steel Housing"* 17

Fig. 19 – Possibilidade de arranjo da unidade de vizinhança da "*E.C.C.S. Steel Housing"* 17

Fig. 20 – "*Habitat 67"* 17

Fig. 21 – Esquema de montagem de moradia do "*Habitat 67"* 18

Fig. 22 – Esquema de montagem dos módulos e componentes da *"ZIP House"* 18

Fig. 23 – Croqui da *"ZIP House"* em terreno desnivelado 18

Fig. 24 – Maquete da *"ZIP House"* 19

Fig. 25 – Prospecto da *The Alladin Company* 21

Fig. 26 – Casa móvel do final dos anos 70 22

Fig. 27 – Estrutura para futuros estudos e desenvolvimentos no meio da construção modular 25

Fig. 28 – Demonstração dos cinco diferentes sistemas presentes em uma construção pré-fabricada usual 26

Fig. 29 – Da esquerda para a direita: *Brace frame*, *Shear wall* e *Rigid frame* 27

Fig. 30 – Gráfico de custo e tempo de produção por grau de customização e flexibilidade. Observa-se no quadrado tracejado o domínio da produção *off-site* (ATS, MTO e ETO) 28

Fig. 31 – Na esquerda (malha axial) se observa como se organiza a construção de acordo com o eixo central dos elementos estruturais. Na direita (malha modular) se percebe como se organiza as construções de acordo com a face externa.....30

Fig. 32 – Da esquerda para a direita: materiais (barra metálica), componente (janela), painéis (2D) e módulos (POD 3D). Geralmente, os benefícios da pré-fabricação podem ser realizados como projetos isolados para atingir maiores graus de pré-fabricação.....31

Fig. 33 – Da esquerda para a direita: fundação por pilares, fundação por sapatas lineares e fundação por sapatas contínuas 31

Fig. 34 – Esquema lógico do DfMA 32

Fig. 35 – Comparação entre o modelo convencional de pré-fabricação e o modelo com a aplicação dos princípios do DfMA 34

Fig. 36 – Elementos BIM para a exploração de diferentes módulos 38

Fig. 37 – Tela da simulação de Soon Min Hong *Et al*. mostrando opções geradas (acima), a teia de combinações (abaixo) e o modelo ideal obtido do processo (direita). 38

Fig. 38 – Representação de edifício feito com *U-Build* 42

Fig. 39 – Processo de montagem com *U-Build* 42

Fig. 40 – Interior de edificação feita com o sistema *U-Build* 42

Fig. 41 – Decomposição do módulo e exemplificação de como uma estrutura pode servir para diferentes compartimentos 43

Fig. 42 – Possíveis módulos da UNA BV 43

Fig. 43 – Possíveis formas de composição com módulos da UNA BV 43

Fig. 44 – Galpão de produção da *Bensonwood Homes*.....44

Fig. 45 – Habitação da *Bensonwood Homes* 45

Fig. 46 – Estudo de evoluções do modelo da *Njordrum* com 1 e 2 módulos 45

Fig. 47 – Representação do modelo da *Njordrum* 46

Fig. 48 – Exemplo de grelha modular de 3M x 3M, onde cada M diz respeito a uma unidade modular e a marcação em roxo diz respeito a um elemento modular posicionado 52

Fig. 49 – Grelha modular, onde se vê em roxo a posição dos painéis intercambiáveis, sendo que cada um desses possui 1200mm (ou 1M) de dimensão lateral 53

Fig. 50 – Grelha estrutural, onde se vê em amarelo a posição dos pilares de 200mm x 200mm 54

Fig. 51 – Esquema de evolução com Núcleo-base (Módulo Hidráulico e Módulo Sala) e possíveis posições de quartos 54

Fig. 52 – Relação entre os componentes distintos de uma edificação 55

Fig. 53 – Simulação da volumetria, onde se vê a estrutura e painéis coloridos de 1200mm (1M) de largura cada 56

Fig. 54 – Esquema de habitação suspensa para a passagem de tubulações abaixo 57

Fig. 55 – Esboço inicial de alimentação de água e esboço de saída de esgoto da Parede Hidráulica 58

Fig. 56 – Esquema da tubulação definida para a Parede Hidráulica 58

Fig. 57 – Esboço de uma seção do telhado 59

Fig. 58 – Bloco *U-Build* explodido e sem a face frontal 59

Fig. 59 – Esboços de volumetria 66

Fig. 60 – Esboços de habitação 67

Fig. 61 – Interface gráfica do *Rhinoceros* + *Grasshopper* (cadeia à esquerda e produto da cadeia à direita) 67

Fig. 62 – Vista superior do Módulo QB 73

Fig. 63 – Módulo QB completo 73

Fig. 64 – Módulo QB sem revestimentos e equipamentos 74

Fig. 65 – Módulo QB com a parede aberta 74

Fig. 66 – Simulação de compartimento 77

Fig. 67 – Código para importação e painel e visualização de painel opaco 78

Fig. 68 – Chaves seletoras do primeiro grupo e possibilidades de escolha de uma das chaves seletoras 79

Fig. 69 – Chaves seletoras das quatro paredes de um módulo (contém três painéis em cada parede) e visualização do resultado 79

Fig. 70 – Perspectiva do tabuleiro modular contendo 5 x 10 quadrículas, de 3M x 3M cada 80

Fig. 71 – Simulação de uma planta de tipologia T2 (núcleo-base + 2 quartos) 80

Fig. 72 – Inserção de componentes na simulação de uma planta de tipologia T2 (núcleo-base + 2 quartos) 80

Fig. 73 – Habitação da *Njordrum* com 4 módulos e eixo de evolução assinalado 81

Fig. 74 – Esquema de evolução de plantas do Grupo 1, com Núcleo-base e possíveis posições dos quartos.....81

Fig. 75 – Esquema de evolução de plantas do Grupo 2, com núcleo base e possíveis posições dos quartos.....82

Fig. 76 – Tabuleiro com quadrantes de posições que vão do P1 (posição 1) ao P28 (posição 28). Observação.: a quadrícula Entrada (sala) corresponde à posição P4 (posição 4) 84

Fig. 77 – Codificação inicial e representação de casa e tipologia T4.....84

Fig. 78 – Simulação de habitação T4 e respetivos códigos de cada um dos módulos 85

Fig. 79 – Chaves seletoras de gerador de habitação por evolução 85

Fig. 80 – Cadeia de funções do gerador 86

Fig. 81 – Função *GHPython* que filtra a tipologia e a variante da planta de acordo com a ativação de seu gerador 86

Fig. 82 – Modelo de bloco 86

Fig. 83 – Importação do bloco no *Grasshopper* e visualização do *Rhinoceros* de habitação de tipologia T2 87

Fig. 84 – Importação do bloco no *Grasshopper* e visualização do *Rhinoceros* de habitação de tipologia T1 87

Fig. 85 – Módulo Sala (NS) 88

Fig. 86 – Módulo Hidráulico (NM).....88

Fig. 87 – Módulo Quarto genérico (q1, q2, q3 e q4).....88

Fig. 88 – *Plugin GHPython* do *Grasshopper* e planta de tipologia T4 (número 1) 88

Fig. 89 – Esquema da atribuição de códigos aos painéis 89

Fig. 90 – Desenvolvimento dos painéis do módulo sala do núcleo base 90

Fig. 91 – Combinações de painéis de acordo com a presença de módulos e planta formada 90

Fig. 92 – Chaves seletoras para posicionamento do *deck* e da escada 91

Fig. 93 – Demarcação em azul do alinhamento da cumeeira por defeito 91

Fig. 94 – Demarcação em verde do alinhamento da cumeeira em habitações cujos módulos ocupam as linhas 2, 3 e 4, e as colunas 3 e 4 92

Fig. 95 – Demarcação em rosa do alinhamento da cumeeira em habitações cujos módulos ocupam as linhas 2, 3 e 4 e as colunas 4 e 5 92

Fig. 96 – Cadeia de fechamentos laterais de telhado no *Grasshopper* 93

Fig. 97 – Código da função *GHPython* para fechamentos laterais de telhado 94

Fig. 98 – Cadeia de fechamentos traseiros dos telhados das plantas do Grupo 1 e habitação T3 de número de planta 4 94

Fig. 99 – Esquema da rotação do telhado 95

Fig. 100 – Função *GHPython* para rotação dos telhados 95

Fig. 101 – Cadeia de fechamento lateral à esquerda e habitação de tipologia T2 à direita 95

Fig. 102 – Cadeia de criação de lista 96

Fig. 103 – Função *Panel*, com o quantitativo de elementos do telhado de uma habitação de tipologia T3 96

Fig. 104 – Parte de lista de elementos de edificação de tipologia T3 97

Fig. 105 – Perspectiva geral das cadeias de funções com os blocos das quatro funcionalidades (Geração de Habitação no topo, Edição da habitação gerada no canto inferior esquerdo e Lista de elementos da habitação gerada no canto inferior direito) 97

Fig. 106 – Chaves seletoras iniciais para a Geração de Habitação 97

Fig. 107 – Parte de bloco de Edição da habitação gerada, onde se realiza alterações no *deck*, na posição da escada frontal e em todos os painéis da edificação 98

Fig. 108 – Parâmetros definidos inicialmente e perspectiva superior da habitação gerada automaticamente 98

Fig. 109 – Parâmetros definidos e perspectiva traseira de habitação gerada automaticamente 99

Fig. 110 – Perspectiva superior com quarto da posição P3 99

Fig. 111 – Perspectiva superior com quartos nas posições P12 e P5 ao centro 100

Fig. 112 – Perspectiva superior com quarto na posição P18 ao centro 100

Fig. 113 – Perspectiva superior com Núcleo-base na porção inferior central 100

Fig. 114 – Parâmetros configurados 101

Fig. 115 – Perspectiva da habitação onde se vê a fachada frontal e a fachada direita 101

Fig. 116 – Perspectiva da habitação após alteração dos painéis, onde se vê a fachada frontal e a fachada direita 102

Fig. 117 – Perspectiva da habitação após alteração dos painéis, onde se vê a fachada frontal e a fachada esquerda 102

Fig. 118 – Perspectiva da estrutura da habitação 102

Fig. 119 – Perspectiva da estrutura e placas de piso da habitação 102

Fig. 120 – Perspectiva da estrutura e placas de piso e de *deck* da habitação 103

Fig. 121 – Perspectiva da estrutura, placas de piso e de *deck* e painéis da habitação 103

Fig. 122 – Perspectiva da estrutura, placas de piso e de *deck*, painéis e laje de cobertura da habitação 103

Fig. 123 – Perspectiva da estrutura, painéis de piso e de *deck*, painéis, laje de cobertura e telhado da habitação 103

ÍNDICE DE TABELAS

Tab. 01 – Quantidade de trabalhos encontrados nas plataformas através da pesquisa simples (1)..... 7

Tab. 02 – Quantidade de trabalhos encontrados nas plataformas através da pesquisa composta (2) .. 8

Tab. 03 – Compilação de informações sobre produtos e fabricação 29

Tab. 04 – Compilação de informações sobre as grelhas 30

Tab. 05 – Estratégias e benefícios do DfMA..... 33

Tab. 06 – Funcionamento do mecanismo e tratamento do usuário 37

Tab. 07 – Tabela elaborada por Tedd Benson..... 44

Tab. 08 – Cronograma de desenvolvimento do Caso de Estudo..... 51

Tab. 09 – Tipologias e seus módulos constituintes..... 55

Tab. 10 – Necessidades, motivos e soluções adotadas para a modelação do bloco padrão..... 60

Tab. 11 – Blocos 61

Tab. 12 – Listagem dos componentes e suas características principais 62

Tab. 13 – Lista de Regras de Composição 63

Tab. 14 – Elementos estruturais 68

Tab. 15 – Painéis do projeto 69

Tab. 16 – Lajes de piso 72

Tab. 17 – Componentes de telhado 75

Tab. 18 – Componentes de *deck* 76

Tab. 19 – Exemplo de quatro plantas diferentes que foram geradas 82

Tab. 20 – Futuras intervenções a serem feitas no Modelo Paramétrico e justificativas 105

Tab. 21 – Atualização da Lista de Regras de Composição 106

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

CAD – *Computer aided design* (*design* assistido por computador)

CAM – *Computer aided manufacturing* (fabricação assistida por computador)

CNC – Controle numérico computadorizado

DfMA – *Design for manufacturing and assembly* (design para produção e montagem)

DEC – Departamento de Engenharia Civil (Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto)

In situ – No sítio (de construção)

Off-site – Fora do sítio (de construção)

R&D – *Research and development* (pesquisa e desenvolvimento)

1

INTRODUÇÃO

Por mais que as tecnologias empregues na construção industrializada tenham evoluído fortemente ao longo das últimas décadas, é notório que constrangimentos ainda impedem a sua adoção de uma forma mais alargada. Um dos principais deles se dá devido ao conflito entre a qualidade de produção e a qualidade do *design*. Segundo Smith (2010, 90),

> *"(...) ao passo que a qualidade de produção aumenta, a arquitetura se torna mais padronizada, branda e invariável, enquanto um projeto altamente customizado sugere uma inevitável quebra na eficiência da produção"*.

Ao passo que segundo o autor Smith (2010, 91), *"(...) qualquer variação do padrão apresenta potencial vulnerabilidade para o proprietário, designers e produtores"*, é evidente que na maioria dos projetos, onde a maior produtividade e os menores custos associados ditam as escolhas, sempre se intenciona a obtenção da melhor qualidade de produção em detrimento da qualidade do *design*. Isso, consequentemente, leva a projetos padronizados e com flexibilidade imensamente reduzida. Ao se considerar que há mais de 70 anos modernistas como Mies Van der Rohe e Walter Gropius formularam projetos que continham liberdade para gerar flexibilização espacial e adição de compartimentos, há de se refletir que os caminhos tomados pelo setor da construção industrializada devido a questões mercadológicas geraram uma perda em termos arquitetónicos aos seus produtos, suprimindo flexibilizações e evoluções. Ademais, outro constrangimento se dá através de uma falha de abordagem das empresas, é importante que a construção pré-fabricada precisa acontecer através de um processo integrado. Segundo Smith (2010, 46), *"(...) muitas falhas na pré-fabricação ocorrem devido à falta de um processo integrado nas fases iniciais de planeamento de um projeto"*. O autor evolui essa ideia de integração ao estipular que

> *"(...) a equipe, o tipo e a localização de um projeto têm um grande impacto na extensão da pré-fabricação empregue. Contudo, um fator igualmente importante é o contexto colaborativo da equipe na qual o projeto é realizado. Em qualquer projeto de construção, os membros da equipe devem determinar antecipadamente a capacidade do projeto para utilizar a produção externa. Isso requer um processo de entrega colaborativo e integrativo".* (Smith 2010, 53)

É importante pontuar que esse modo de produção construtiva difere do tradicional e mais corrente, onde há uma cultura de separação das disciplinas de *design* e construção. Dessa maneira, segundo o autor

Smith (2010, 98), esta cultura se torna um entrave para a consolidação dos sistemas de construção pré-fabricados. Outro notável constrangimento da construção industrializada é a relutância em incorporar novas tecnologias. Segundo Qi et al. (2021), há essa relutância devido a possíveis interrupções no processo de trabalho, aos custos associados a hardware e *software*, e ao aumento da complexidade das operações e o desconhecimento dos benefícios. Ademais, outro entrave na construção industrializada se dá pela falta de comunicação e cooperação entre intervenientes, facto que se soma à falta de conhecimento e experiência dos mesmos (Abd Razak et al. 2022).

Dessa maneira, é importante àqueles que adentrem nessa área, que busquem não apenas desenvolver trabalhos disruptivos em vista da melhor eficiência, economia e atenção ambiental, mas que também seja levada em consideração a potencialidade de adesão pelo mercado, bem como também seja levada em conta a dicotomia entre qualidade de produção e qualidade do *design*, sempre em busca de um resultado óptimo que gere ao usuário um produto que corresponda às suas expectativas funcionais. Naquilo que tange ao processo de conceção de projeto, especificamente, é interessante o desenvolvimento de trabalhos investigativos sobre ferramentas informáticas atuais, metodologias de projeto, gestão de projeto de construção como se dá a conexão entre equipas – de forma que o processo de conceção seja positivamente impactado na redução de tempo das tarefas, no maior controle e organização das tarefas, na maior conexão entre profissionais de equipas diferentes e na maior qualidade agregada no projeto final.

1.1. MOTIVAÇÕES

Diante dessas informações e ponderações sobre as problemáticas da construção industrializada, encontra-se um campo fértil para estudos e desenvolvimentos, esse que está aberto para novas tecnologias, metodologias e revisões dos conhecimentos já existentes de projeto. Por mais que o cenário da construção pré-fabricada apresente de uma forma geral melhorias perante o que se via há algumas décadas devido o avanço de tecnologias e materiais, todo tipo de contributo é louvável. A priori, este trabalho se centrará na tentativa de identificação mais acurada dos constrangimentos no projeto de arquitetura de habitações pré-fabricadas, para que assim possam ser compiladas ideias para tornar a execução de construções modulares mais sustentável e económica, mas sem se esquecer do objetivo principal, que é gerar um produto final que seja adaptativo e agregador às vidas dos usuários. Posteriormente, será proposto como Caso de Estudo a elaboração de um projeto contendo o compêndio do conteúdo encontrado, sempre com o claro objetivo de sintetizar, revisar e incorporar informações a esse modo de produção.

Para se alcançar êxito, será necessário constantemente se debruçar sobre problemáticas pertinentes ao modo de produção pré-fabricada na contemporaneidade. Destacam-se duas delas. Primeiramente, deve se descobrir como criar habitações pré-fabricadas de qualidade através de processos mais ágeis, económicos e sustentáveis (um grande desafio tendo-se em vista a falta de visão integrada de grande parte das equipas projetistas). Em segundo lugar, há de se pensar na experiência do usuário no que toca a habitação: como inserir possibilidades de personalização antes e após a construção levando-se em conta as questões estruturais, sociais e culturais da família que usufruirá da edificação (levando-se em conta a ausência do conceito da arquitetura evolutiva em grande parte dos projetos pré-fabricados, é outro grande desafio). Paralelamente a isso, há de se entender os processos relativos à habitação na contemporaneidade, como a valorização do espaço nos núcleos urbanos, o que demanda de projetos cada vez mais racionalizados em busca de criar um adensamento sem comprometer a qualidade de vida, e, notoriamente, o interesse do usuário de obter um produto final que além de atender suas demandas de vida, que também seja acessível e de boa qualidade.

1.2. QUESTÕES DE PESQUISA

Como ponto de partida, foram pensados temas tradicionais da construção civil e outros temas contemporâneos que poderiam ser incorporados – e consequentemente cruzados ou somados – à uma proposta metodológica para que fosse realizada uma **produção sustentável, económica e eficiente** de um **modelo de habitação pré-fabricada** de **alta qualidade**.

- **Arquitetura evolutiva**
  Como o conceito pode ajudar nas problemáticas levantadas: pode ajudar a aumentar o senso de pertencimento devido ao facto de se conectar com as demandas do usuário e suas mudanças de vida.
  Como realizar: proposição de uma ampla gama de opções de personalização durante a fase de projeto e um sistema construtivo aberto que permita que a edificação seja facilmente alterada durante a utilização.

- ***Design* generativo**
  Como o conceito pode ajudar nas problemáticas levantadas: pode ajudar a produzir projetos de forma mais ágil e precisa, levando a economia de tempo e custos.
  Como realizar: através da proposição de um Modelo Paramétrico que pode facilmente ser alterado e rapidamente enviado para as equipas de produção e montagem.

- **DfMA**
  Como o conceito pode ajudar nas problemáticas levantadas: pode ajudar a conduzir um processo de produção mais sustentável e maior conexão entre as equipas.
  Como realizar: através da proposição da implementação das práticas do DfMA no processo de projeto, além da criação de um projeto de fácil leitura que entenda o contexto de todas as equipas.

1.3. OBJETIVOS

Para se delimitar os objetivos, foi necessário definir um trabalho de investigação congruente com as questões de pesquisa propostas. Dessa maneira, foram pensados os objetivos abaixo:

- **Objetivos gerais**
  1. Identificação das principais problemáticas e desafios atuais no que tange o projeto de habitações pré-fabricadas;
  2. Pesquisas sobre a conceituação e regras referentes à construção industrializada, arquitetura evolutiva, DfMA e *design* generativo na contemporaneidade;
  3. Reflexão sobre os conteúdos encontrados;
  4. Apontamento de possíveis melhorias no escopo da construção industrializada.

- **Objetivos específicos**
  1. Definição dos componentes mais importantes em uma edificação pré-fabricada, em vista de incorporá-los ao projeto;
  2. Definição de melhores estratégias de evolução arquitetónica, também em vista de incorporá-las ao projeto;
  3. Busca de práticas para dar ao morador-usuário a possibilidade de personalização, fazendo com que o mesmo se sinta pertencente à habitação em que vive;
  4. Definição de materiais de interesse;
  5. Definição de um *software* de *design* generativo que permita explorações paramétricas;

6. Criação de um Modelo Paramétrico modular de uma habitação tipo;
7. Validação do projeto, coleta de informações e direcionamento para futuros estudos.

Para se obter o resultado esperado dos objetivos específicos, seria então necessário traçar uma metodologia de pesquisa de trabalhos análogos, realizar a revisão dos mesmos, definir parâmetros de interesse para o Modelo Paramétrico e definir em qual plataforma e *software* viria a ser criado. No capítulo subsequente do Estado da Arte e Caso de Estudo estão expostas as estratégias que foram tomadas até o pleno desenvolvimento do objeto deste trabalho.

Por fim, destaca-se que a intenção deste trabalho sempre foi estar em consonância com diretrizes de boas práticas na construção civil, sendo as principais:

- Otimização do processo de conceção do projeto e otimização do processo de produção (economia de tempo, diminuição do orçamento);
- Sustentabilidade na construção (uso otimizado dos recursos/planeamento da pós-utilização);
- Aumento do senso de pertencimento e melhoria da experiência do usuário (projetos onde pessoas tenham possibilidade de personalizar de acordo com as mudanças de suas vidas).

Esperou-se que essas diretrizes fossem aplicadas às temáticas investigadas e sustentariam um ideário, esse que seria redigido em formato de lista para poder embasar o objectivo-mor do Caso de Estudo: o desenvolvimento de um Modelo Paramétrico que realizaria projetos construtivos de forma célere, precisa e com possibilidade de personalizações futuras, evidenciando uma metodologia que traria vantagens em todos os períodos da vida edificação, seja no processo de conceção de projeto/produção, no processo de utilização e no processo de pós-vida da edificação.

2

ESTADO DA ARTE

2.1. INTRODUÇÃO

Afim de se encontrar trabalhos análogos que pudessem responder aos questionamentos propostos, primeiramente realizaram-se pesquisas de trabalhos análogos em bancos de dados de grande representatividade (*Web of Science*, *Scopus*, *Google Scholar*, *Springer* e catálogo da Universidade do Porto). Através de cinco específicas palavras chave, essas estabelecidas após reflexões sobre os objetivos do trabalho e sessões de orientação, foram encontrados os conteúdos de interesse.

2.2. CONCEITOS

- **Habitação evolutiva:**
  A habitação evolutiva, aquela que segundo Schneider e Till (2007, 4) pode se ajustar às necessidades de mudança pessoais (como aumento da família), práticas (como envelhecimento de algum membro) e tecnológicas (como a troca de uma infraestrutura antiga por alguma atualizada), se tornou uma das principais bases deste estudo. Isso deve-se ao facto de que a possibilidade de se criar residências que possam se adequar à vida do usuário aumenta longevidade da mesma, visto que quanto maior a possibilidade de responder às demandas funcionais ou estéticas do usuário, mais o usuário se sentirá refletido nela. Foi estudada a conceituação desse tipo de construção e foram posteriormente estudados modelos de residências evolutivas e seus aspetos físicos, esses que foram sintetizados e transformados em parâmetros para a criação do produto do Caso de Estudo.

- **Construção pré-fabricada:**
  As habitações pré-fabricadas, habitações essas cujos componentes e módulos são produzidos fora do sítio de instalação, terão enfoque neste trabalho. Foi estudado o contexto social e tecnológico desse tipo de construção, as regras elementares da construção modular e sistemas modulares, e os principais sistemas construtivos modulares para habitação. A motivação principal deve-se pelo facto de que as habitações pré-fabricadas carregam inúmeros benefícios, entre eles a possibilidade de se entregar um projeto com maior agilidade comparado as habitações feitas *in situ* (Smith 2010, 84), com maior qualidade (Smith 2010, 91), com maior segurança aos trabalhadores (Smith 2010,

86) e com melhor controle de custos do que outros métodos construtivos (Smith 2010, 81). Ademais, a construção industrializada se difere da *in situ* no quesito inovação, visto que enquanto a primeira permite possui capacidade e controle de R&D *(Research and Development)* (Smith 2010, 97), a segunda tem constrangimentos nesse quesito (Smith 2010, 94), o que leva a um cenário com maior dificuldade de realizar inovações. Isto é sobretudo um incentivo para se aprofundar na área da construção industrializada.

- **Construção modular:**
  A construção modular, traz como principal característica a forma de organização lógica dos elementos. Isso deve-se por seu projeto se destacar pela racionalização devido à definição de uma unidade básica, unidade essa que faz com que módulos possam ter elementos intercambiáveis. Foi estudada a lógica desse tipo de construção e suas regras elementares com o objetivo de converter as informações geradas em parâmetros para a criação do produto do Caso de Estudo. Ademais, cabe ressaltar que os conteúdos encontrados através dessa palavra chave foram futuramente apresentados conjuntamente com os conteúdos encontrados através da palavra-chave "Construção pré-fabricada", tendo em vista que embora diferentes, são temas intimamente relacionados e que apresentam maior qualidade quando são executados conjuntamente.

- **DfMA *(design for manufacturing and assembly)*:**
  DfMA é outro conceito que ganhou força neste trabalho. Se conecta intimamente com as habitações pré-fabricadas, pois é uma metodologia que agrega e orienta práticas para a produção industrial de componentes.
  Foi estudada a relação do DfMA com as habitações feitas de forma *off-site*, além de buscar traçar como o DfMA se relaciona com o *design* paramétrico na atualidade. O DfMA tende a influenciar a forma dos elementos que comporão o objeto do Caso de Estudo.

- ***Design* generativo:**
  Por fim, o *design* generativo, esse que diz respeito à forma de se projetar-desenhar usando de algoritmos predefinidos, é o ponto de convergência entre todos os temas deste trabalho, visto que pretendeu-se cruzar todo o conteúdo estudado a fim de se criar um Modelo Paramétrico 3D. Tal escolha deve-se ao facto de que o *design* generativo, além de possuir um apelo emergente, segundo El-Zanfaly (2009) *"(...) permite a criação de uma relação entre máquina e mente humana através de estratégias algorítmicas".* Dessa maneira, abre precedentes para novos estudos e desdobramentos através da possibilidade de colocar a máquina e as codificações que a compõe como ferramentas para experimentações.

  Foram estudados os *softwares* mais correntes para o *design* generativo e sua influência na atualidade na produção de habitações a fim de apontar suas potencialidades.

2.3. REVISÃO BIBLIOMÉTRICA

Devido às cinco palavras chave serem relacionadas a campos muito vastos de informação, elas foram combinadas umas com as outras para que assim pudessem ser encontrados conteúdos mais aproximados das propostas deste trabalho. Tais combinações foram utilizadas em cinco motores de busca (*Scopus*, *Web of Science*, *Google Scholar*, *Springer* e Catálogo UPorto), incluindo também traduções das combinações para a língua inglesa, para que assim pudessem ser encontrados materiais produzidos fora dos países lusófonos.

A priori, almejou-se que os assuntos encontrados após a pesquisa dos termos "Habitação evolutiva", "Construção pré-fabricada", "Construção Modular" e "DfMA" fossem o cerne conceitual do trabalho.

Esperou-se que todos esses quatro itens embasassem uma lista de parâmetros que pudessem ser codificados e trabalhados dentro de uma plataforma que permitisse a prática do "*design* generativo".

Dessa maneira, foi importante que a relação abaixo (Fig. 01) ocorresse.

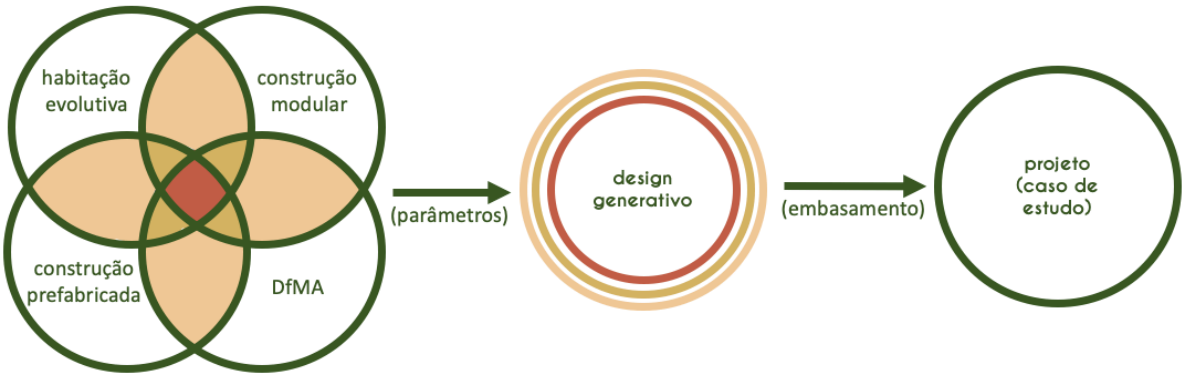


Fig. 01: Expectativa de relação dos temas.

2.3.1. RESULTADOS

Após o período de buscas, foram encontrados materiais em cada uma das cinco plataformas (Tab. 01). Posteriormente efetuou-se uma filtragem temática através de pesquisas compostas, essas conformadas pela composição de no mínimo dois temas, o que ocasionou em uma considerável queda do número de trabalhos (Tab. 02). Tal estratégia se mostrou eficiente por indicar possíveis direções de investigação. Ademais, o conteúdo encontrado, além de permitir analogias (permite referenciamentos no trabalho), também impede duplicidade de produção (no caso de já existir trabalhos semelhantes).

Tab. 01: Quantidade de trabalhos encontrados nas plataformas através da pesquisa simples (1).

Tema principal	*Scopus*	*Web of Science*	*Google Scholar*	*Springer*	UPorto
Design generativo	4052	863	15177	58962	2
Habitação evolutiva	509	68	253	80017	11
Construção modular	88255	1027	18440	51410	27
Construção pré-fabricada	3590	537	3313	10218	2
DfMA	1368	229	6460	505	1

Tab. 02: Quantidade de trabalhos encontrados nas plataformas através da pesquisa composta (2).

Tema principal	*Scopus*	*Web of Science*	*Google Scholar*	*Springer*	UPorto
Design generativo	104	8	0	95	-
Habitação evolutiva	24	2	0	14	-
Construção modular	188	5	634	172	4
Construção pré-fabricada	43	2	1	938	-
DfMA	-	-	-	-	-

Percebe-se que não há uma clara proporção entre os temas e as bases. Além disso, algumas bases apresentaram mais informações que outras. Devido à discrepância, os pormenores referentes a esses dados podem ser melhor visualizados nas tabelas 01 e 02 do que nos gráficos. Cabe destacar que foram feitas pesquisas de conteúdos produzidos apenas a partir de 2015, para que assim pudessem ser encontrados materiais mais recentes.

2.3.2. REFINAMENTOS

A fim de se obter os conteúdos mais cristalinos que efetivamente agregassem à dissertação, foram excluídos resultados que se mostraram desinteressantes ao desenvolvimento da tese. O critério de exclusão se deu com base nos próprios objetivos gerais e específicos. Dessa forma, foram selecionados os trabalhos que continham potencial de responder as demandas do trabalho, que foram convertidas nas seguintes perguntas:

- **Habitação evolutiva, Construção modular e Construção pré-fabricada:**
  - O que é?
  - Qual o seu contexto histórico?
  - Qual o seu estado na atualidade?
  - Quais são os seus princípios gerais?
  - Quais habitações-construções poderiam agregar ao projeto do Caso de Estudo?
- ***Design* generativo**
  - O que é?
  - Como se liga à indústria da construção civil na atualidade?
- **DfMA**
  - O que é?
  - Como se liga ao *design* generativo e à indústria da construção civil na atualidade?

Posteriormente, trabalhos que envolvessem uma tipologia de uso diferente ou que envolvessem uma análise centrada em uma especificidade desinteressante, foram descartados. A filtragem inicial partiu da leitura do próprio título e a leitura de seu resumo. Tais trabalhos foram somados a outros trabalhos que foram indicados em sessões de orientação, esses não necessariamente datados a partir de 2015, mas que mesmo assim foram considerados devido ao potencial de se encontrar informações sobre a conceituação dos temas desenvolvidos. A biblioteca inicial continha 98 trabalhos, número que posteriormente caiu para 51.

Por fim, a fim de se apresentar as relações entre os materiais encontrados e identificar possíveis lacunas de estudo, foram realizados mapas de interações dentro do *software Vosviewer*, sendo o mapa da Fig. 02 de maior relevância. Este mostra a relação das palavras chave de todos os artigos refinados. Infere-se que os campos da construção *off-site*, DfMA, BIM e pré-fabricação estão fortemente relacionados. No entanto, os conteúdos referentes à customização em massa e *design* evolutivo não se conectam a esse núcleo – o que aponta uma interessante possibilidade de trabalho, visto que poucos estudos e reflexões foram realizados com esses temas em conjunto.

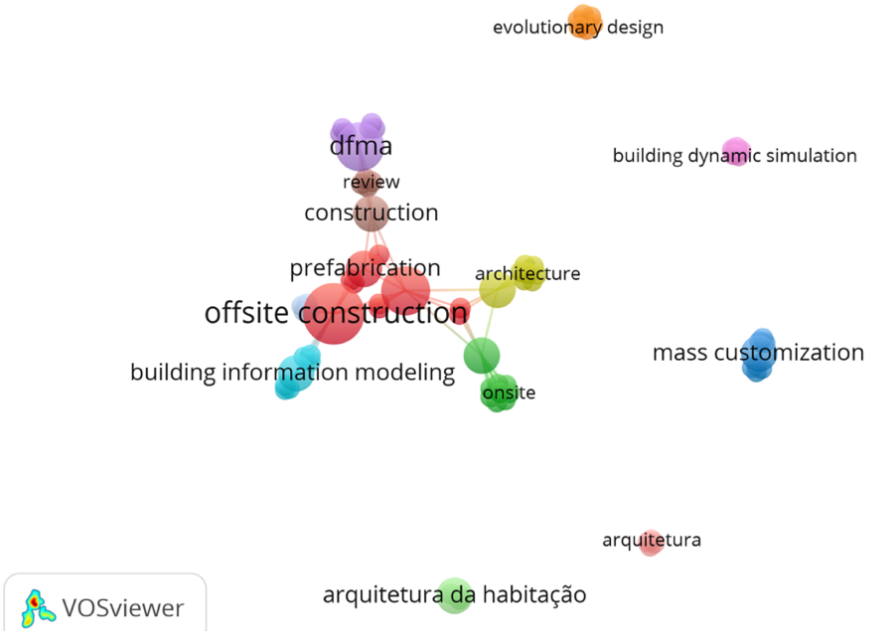


Fig. 02: Mapa de interações.

Diante dos materiais encontrados, partiu-se para a revisão dos conteúdos de cada uma das palavras chaves encontradas, utilizando das perguntas supracitadas como uma estruturação para a apresentação.

2.4. DESENVOLVIMENTO DAS TEMÁTICAS

2.4.1. HABITAÇÃO EVOLUTIVA

Como o nome previamente diz, a Habitação Evolutiva está intimamente relacionada a uma mudança, uma progressão. Mesmo em um contexto onde um compartimento seja subtraído, há de destacar que tal subtração também é uma evolução, pois corresponde a um propósito funcional, a uma particular necessidade do morador para o presente e o futuro. Segundo Bárbara Rangel, pesquisadora e professora da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto,

> *"A habitação evolutiva nasce com o objetivo de ser transformada ao longo do tempo, não só por razões funcionais como espaciais, mas, para que essas alterações não comprometam o funcionamento da casa e do conjunto onde se insere, devem ser previstas durante o processo de projeto."* (Rangel, Bárbara 2013, 46)

Discorreram sobre o mesmo tema a dupla de professores Jeremy Till e Tatjana Schneider, esses responsáveis pelo livro *Flexible Housing*;

> *"(...) habitação flexível permite que os responsáveis pela habitação adaptem as unidades, alterem layouts e também atualizem suas propriedades de maneira económica"* (Schneider e Till, 2007, 5).

Dessa maneira, disseram que a habitação flexível (evolutiva), além de provir vários tipos de mudança, deve também provir a intervenção de uma forma económica, ou seja, deve ser facilmente exequível através da utilização mínima de recursos. Ainda segundo os autores, a habitação evolutiva:

> *"(...) excede a definição de "casas vitalícias", o termo usado para descrever habitações que podem ser adaptadas para acomodar as necessidades físicas dos utilizadores, em particular à medida que envelhecem ou perdem mobilidade."* (Schneider e Till 2007, 5).

Com essa afirmação estabeleceram que a habitação evolutiva não é apenas um modelo específico voltado a somente uma função (como acompanhar o envelhecimento, por exemplo), mas é algo para além, oferece maiores aberturas e possibilidades de mutações. Assim, se confere que não é um produto destinado a somente um grupo, demonstrando seu alto poder de impacto social.

Ao passo que o senso de lugar *(Sense of Place)* é, segundo Steele Fritz (1981, 12),*"(...) criado por um padrão de reações que um ambiente estimula em uma pessoa"*, a habitação evolutiva tende a se mostrar como uma interessante alternativa pelo simples facto de o artifício da personalização permitir maior identificação entre usuário e edificação. A habitação evolutiva tem maiores chances de gerar no usuário o **sentimento de pertencimento**, esse um dos grandes objetivos da arquitetura.

- ENQUADRAMENTO HISTÓRICO

Há de se considerar duas informações elementares que nortearão este enquadramento:

i. A relação entre a modificação da moradia à mudança das características de um núcleo familiar não é uma ideia recente.

> *"Este conceito de habitar não é novo, é provavelmente o mais antigo de sempre. Qualquer casa vernacular, das rurais às senhoriais, nasciam já com o pressuposto crescer ao longo do tempo de acordo com as necessidades da família que a habitava. Os aglomerados compunham-se segundo uma estrutura molecular que permitia o crescimento da propriedade de cada família.* (Rangel, Bárbara 2013, 46)

Dessa maneira, ao se partir do pressuposto que a vida de uma família não é uma constante e sempre em algum determinado momento terá alguma mudança, como uma junção matrimonial, o nascimento ou o falecimento de algum membro, há de se considerar que a casa sempre foi adaptada pela família a fim de satisfazer suas necessidades do momento.

ii. O projeto da habitação evolutiva, esse que usualmente possui um núcleo base e prevê que aconteçam alterações futuras dentro de grelhas, métricas e regras, não é algo novo. Por mais que os trabalhos

realizados pelos arquitetos modernistas e a massiva industrialização ocorrida no século XX deem certa impressão de que esse conceito seja relativamente recente dentro da história da arquitetura, há centenas de anos já se observavam estruturas funcionalmente similares, legítimos embriões dos modelos habitacionais que vemos nos dias de hoje. Schneider e Till (2007, 13) apontam que *"(...) a habitação evolutiva parece ter se desenvolvido de duas maneiras. A primeira é o resultado das condições da arquitetura vernacular. A segunda, o resultado de pressões externas que levaram projetistas e intervenientes a desenvolver soluções de design".*

Segundo Rangel, Bárbara (2013, 304), nas habitações evolutivas basicamente se verificam três elementos principais: o **lote** (espaço destinado à construção e intervenção), os **módulos construídos** (espaços fechados habitáveis) e os **módulos livres** (espaços exteriores privados). A moradia que dispunha dessas características nos tempos do império romano (27 a.C a 476 d.C) é classificada por "Casa Pátio Romana" (Fig. 03 e 04). Essa era basicamente um modelo de arquitetura vernacular projetada para crescer e se moldar de acordo com as exigências funcionais de seus moradores, sejam elas recreativas, restaurativas ou mercantilistas (Rangel, Bárbara 2013, 51). Ademais, ao longo da história da arquitetura modelos similares de construções evolutivas também foram conferidos nas sociedades chinesa (Casa Pátio Chinesa), japonesa (Fig. 05 e 06) e islâmica (Fig. 07) (Rangel, Bárbara 2013, 50–53).

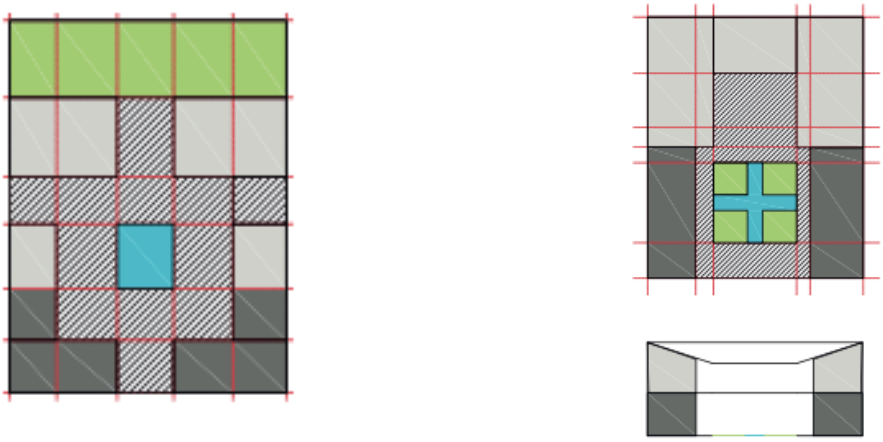


Fig. 03 e 04: Esquema de evolução da Casa Pátio Romana; Esquema de evolução da Casa Pátio Chinesa.

(Figura de Bárbara Rangel Carvalho, 2013, *Proposta Metodológica para o Desenvolvimento do Projeto Integrado de Habitação Evolutiva em Portugal* (DEC, UPorto), 50-51).

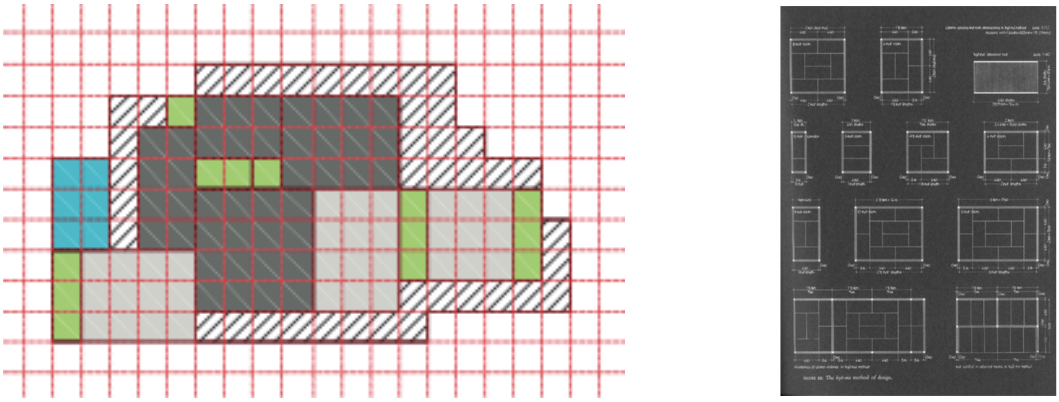


Fig. 05 e 06: Esquema de evolução da Casa Pátio Japonesa; Modulação da Casa Pátio Japonesa.

(Figura de Bárbara Rangel Carvalho, 2013, *Proposta Metodológica para o Desenvolvimento do Projeto Integrado de Habitação Evolutiva em Portugal* (DEC, UPorto), 52).

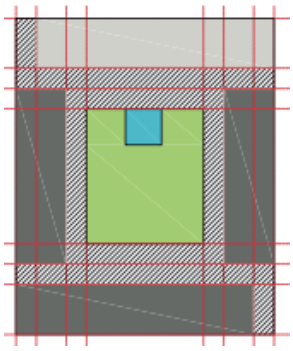


Fig. 07: Esquema de evolução da Casa Pátio Islâmica.

(Figura de Bárbara Rangel Carvalho, 2013, *Proposta Metodológica para o Desenvolvimento do Projeto Integrado de Habitação Evolutiva em Portugal* (DEC, UPorto), 52).

É notório que cada um desses modelos possui suas singularidades, visto que as premissas de projeto refletem o *Zeitgeist*, a tecnologia disponível no momento e os aspectos culturais da sociedade na qual foi implantada. Mas, ao se olhar para as confluências desses projetos de casa pátio, se retira um valioso denominador comum: percebe-se que os projetos de todas essas buscavam a evolução a partir de um núcleo-base, evolução essa que deveria acontecer dentro da métrica de uma malha conformada por pontos ou linhas virtuais. Segundo Rangel, Bárbara (2013, 52) espaçamento desses pontos e linhas poderiam seguir uma unidade métrica padrão ou uma unidade métrica baseada em um objeto, como as casas pátio japonesas que possuíam modulação embasada pelo *tatami.*

Centenas de anos após, precisamente no período pós-primeira guerra mundial, houve uma necessidade sem precedentes por moradias na Europa. Segundo Schneider e Till (2007, 16),

> *"(...) modelos de habitação urbana, baseados no bloco de apartamentos burguês ou na casa geminada padrão, simplesmente não atendiam às necessidades em termos de economia, densidade ou a escala de provisão necessária. A fim de fornecer um número suficiente de habitações a um custo mínimo, os padrões de espaço foram drasticamente reduzidos e tornaram-se objecto de legislação e, portanto, da atenção dos designers, na maioria dos países europeus."*

Dessa maneira, o desafio-necessidade de se responder às demandas da época fez com que discussões sobre arquitetura ganhassem uma nova tónica. No segundo congresso CIAM de arquitetos internacionais ocorrido em Frankfurt (1929), esse intitulado *"A Habitação para a Mínima Existência",* promoveu debates sobre as melhores soluções para a padronização de novos espaços reduzidos. Uma das respostas foi *"(...) a introdução da noção de flexibilidade. Se há menos espaço, então o espaço precisa ser usado da maneira mais eficiente e flexível possível"* (Schneider e Till 2007, 16).

Walter Gropius foi um arquiteto de suma importância nesse movimento. Segundo Rangel, Bárbara (2013, 70) Gropius criou um modelo de habitação (Casa dos Professores, 1925) para os professores de Bauhaus, onde lecionava, em que a habitação era compreendida como uma soma de volumes, sendo que houve uma ênfase específica na organização das aberturas a fim de gerar os melhores possíveis ganhos de luz e sol. Ainda segundo Rangel, Bárbara (2013, 71) poucos anos após, em 1931, Gropius apresentou ao concurso da Feira de Berlim o projeto da Casa que cresce *(Das Wachsende Haus)*, um projeto evolutivo e pré-fabricado dotado de painéis de madeira revestidos a cobre, esses constituintes de um sistema desmontável que permitia a composição de infinitas volumetrias (Fig. 08). Para Gropius, *"(...) a padronização de componentes individuais de um edifício foi uma oportunidade de prover a maior possibilidade de variabilidade na planta"* (Schneider e Till 2007). Isso demonstra, sobretudo, uma clara conexão com os preceitos modernistas à época, de prover qualidade à edificação através da repetição de elementos. Com a ascensão do nazismo, Gropius emigrou para a América do Norte. Longe de casa,

continuou a executar trabalhos na área, com destaque para a *Package House* (Rangel, Bárbara 2013, 72).

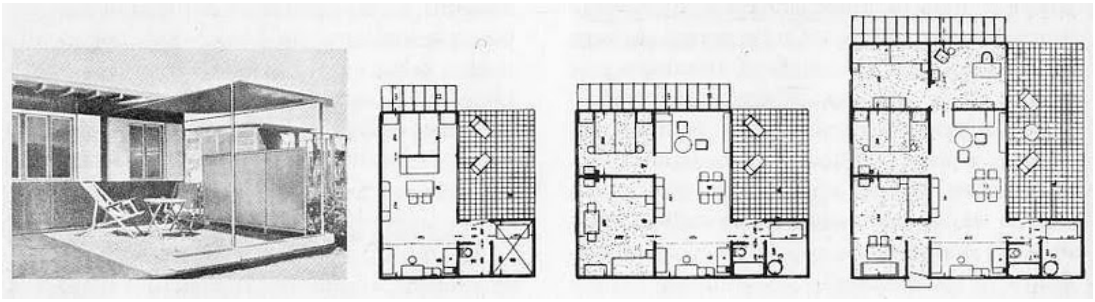


Fig. 08: Plantas esquemáticas da *Das Wachsende Haus* de Walter Gropius.

(Figura de Bárbara Rangel Carvalho, 2013, *Proposta Metodológica para o Desenvolvimento do Projeto Integrado de Habitação Evolutiva em Portugal* (DEC, UPorto), 71).

Outro arquiteto que emigrou para os Estados Unidos e deixou um significativo legado foi Marcel Breuer. Breuer foi discípulo de Walter Gropius em *Bauhaus* e ainda dentro da mesma criou o projeto da *"Small Metal House"* (1925-1927), um modelo de casa pré-fabricada de um ou dois pisos que podia ser construído em até três semanas (Fig. 09). Um ponto interessante são os materiais utilizados em sua composição em um período onde o uso da madeira era predominante nesse modelo construtivo. Segundo Rangel, Bárbara (2013, 72–73), o sistema estrutural era em *light framing*, preenchido com painéis de parede, janelas e portas; sempre peças padronizadas pré-fabricadas.

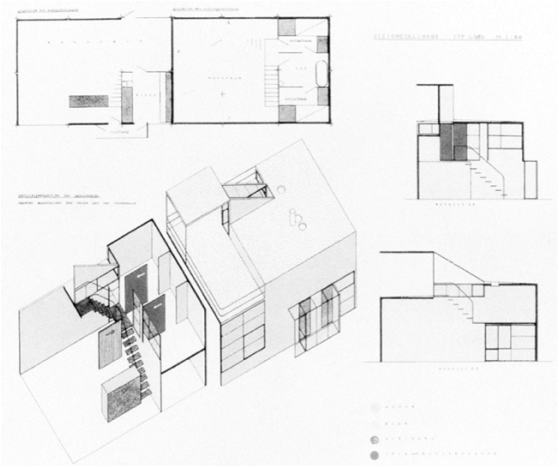


Fig. 09: Plantas esquemáticas da *Small metal house*, de Marcel Breuer.

(Figura de Bárbara Rangel Carvalho, 2013, *Proposta Metodológica para o Desenvolvimento do Projeto Integrado de Habitação Evolutiva em Portugal* (DEC, UPorto), 73).

Outros dois grandes arquitetos que fizeram parte desse movimento e deixaram um vasto conteúdo proveniente de seus projetos e ensaios foram Mies Van der Rohe e Le Corbusier. Se destaca o facto de que de Van der Rohe entre 1931 e 1938 tinha um cerne mais filosófico em seu trabalho do que seus colegas de profissão: deu ênfase ao homem moderno de Nietszche, Zaratrusta, o sujeito que deseja isolamento, segundo Rangel, Bárbara (2013, 75–77). Ademais, Van der Rohe *"(...) argumentava que edifícios deveriam durar mais do que a função para qual foram inicialmente desenhados"* (Schneider e Till 2007), o que demonstra uma grande lucidez sobre a vida da edificação, indicando que ela deveria ter espaço para mudanças futuras.

Segundo Rangel, Bárbara (2013, 77) sobre o modelo "Casa Pátio" de Van der Rohe,

> *"(...) o exterior e o interior eram apenas separados por elementos transparentes, fazendo o exterior parte da composição de cada espaço interior da casa. Dessa articulação entre exterior e interior surgiam vários pátios de diferentes dimensões criando uma hierarquia com distintos graus de privacidade. "*

Isso quer dizer que esse modelo permitia grande liberdade para a flexibilização, facto comprovado também pela análise do sistema construtivo, que visava a desconexão entre a estrutura em aço e suas paredes internas (Fig. 10). Esse conceito, de gerar maior liberdade interior através da desconexão de elementos, remete diretamente ao primoroso trabalho de Le Corbusier, que expôs através seu célebre manifesto *"Cinco pontos para uma nova arquitetura"* (1926) a necessidade da **fachada livre**, de tal forma que embora a casa seja rígida e delimitada, para que assim pudesse ter maior flexibilidade interna Rangel, Bárbara (2013, 81–82). Dentre seus trabalhos que o guiaram até a escrita desse manifesto destaca-se a Casa Dominó (1914), essa que tinha clara preocupação em ser evolutiva, já apresentava a fachada desconectada da estrutura (Fig. 11).



Fig. 10: Vista interna da Casa Pátio de Mies Van der Rohe.

(Figura adaptada de Bárbara Rangel Carvalho, 2013, *Proposta Metodológica para o Desenvolvimento do Projeto Integrado de Habitação Evolutiva em Portugal* (DEC, UPorto), 77).

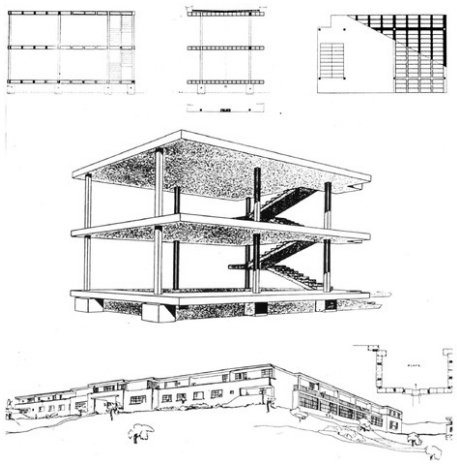


Fig. 11: Esquemas da Casa Dominó, de Le Corbusier.

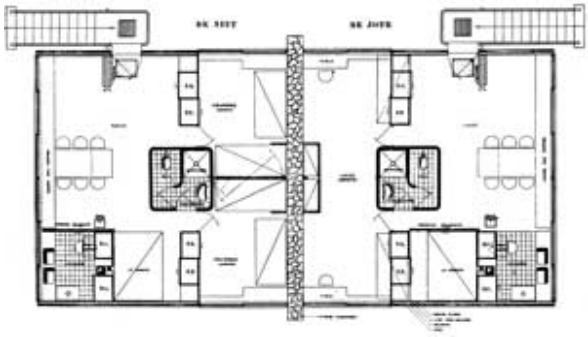
(Figura de Bárbara Rangel Carvalho, 2013, *Proposta Metodológica para o Desenvolvimento do Projeto Integrado de Habitação Evolutiva em Portugal* (DEC, UPorto), 81).

Ademais, cabe a menção que, segundo Rangel, Bárbara (2013, 82) esse embrionário projeto embasou a disciplina que futuramente se reconheceu por **Projeto Integrado**.

> *"Maison Dominó permitiu encontrar uma base para a livre conceção arquitetónica, com base em regras impostas pela indústria, pela técnica e os consequentes ritmos de produção. Esta separação da estrutura da forma iniciou uma nova metodologia de trabalho em Arquitetura baseada na lógica industrial e na produção em série, o PROJETO INTEGRADO"* (Rangel, Bárbara 2013).

Le Corbusier ao longo das seguintes décadas continuou seus trabalhos, apresentando conceitos cada vez mais elaborados e condizentes com a sociedade e as tecnologias em voga. Em 1923, Le Corbusier escreveu "*Para uma nova Arquitetura"*, um manifesto pessoal que argumenta que a beleza da arquitetura moderna está em sua funcionalidade (Smith 2010, 30–31).

Cinco anos após, Le Corbusier elaborou o projeto da *Maison Loucheur*, um modelo de casa flexível que além de ter um interior livre, através de paredes deslizantes e mobiliário móvel, poderia aumentar seu tamanho (Fig. 12 e 13). Corbusier que constantemente provocava, dizendo que o comprador apenas pagava por 46m^2 de espaço, mas através da inteligência do *design*, atualmente ganhava 71m^2 de espaço efetivo (Schneider e Till 2007).



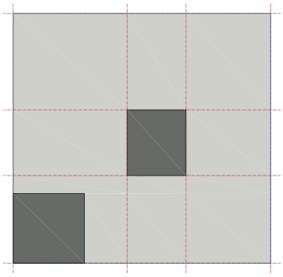
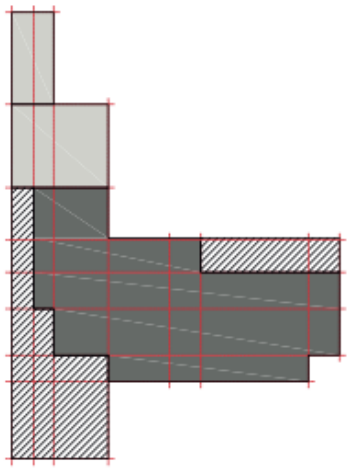


Fig. 12 e 13: Planta da *Maison Loucheur* de Le Corbusier; Esquema de evolução da *Maison Loucheur*.

(Figuras de Bárbara Rangel Carvalho, 2013, *Proposta Metodológica para o Desenvolvimento do Projeto Integrado de Habitação Evolutiva em Portugal* (DEC, UPorto), 83).

Do movimento modernista estadunidense, se destaca Frank Lloyd Wright, ele que foi um modernista inveterado estudioso da temática da habitação evolutiva. Segundo Rangel, Bárbara (2013, 66–68), após Lloyd Wright formular modelos populares de moradia e também formular um modelo de cidade humanizada e desenhada para o homem *(Broadacre City),* em 1947 conseguiu trabalhar suas aspirações com o projeto das *Usonian Houses* (Fig. 14). Esse modelo, baseado na cessão de lotes de 72m² em subúrbios para famílias se caracterizou por ser uma alternativa urbanística mais interessante à época do que o modelo de construir blocos de apartamentos. Ainda segundo Rangel, Bárbara (2013, 66), naquilo que tange o sistema construtivo das habitações, *"(...) Frank Lloyd Wright desenvolveu um bloco de betão modular, especifico para estas casas, que permitia a assemblagem de inúmeras formas. O processo construtivo era de tal modo simples que permitia a montagem pelo próprio proprietário".*



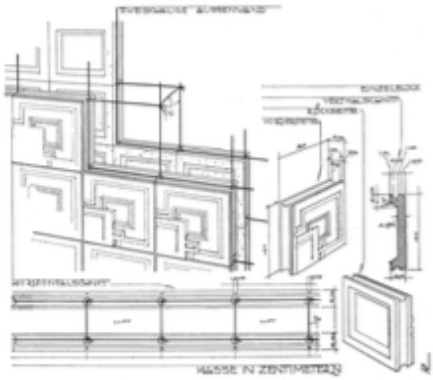
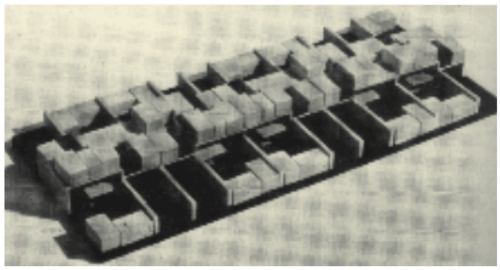


Fig. 14 e 15: Esquema de evolução das *Usonian Houses* (Casa Jacob); Patente dos blocos de Frank Lloyd Wright.

(Figura de Bárbara Rangel Carvalho, 2013, *Proposta Metodológica para o Desenvolvimento do Projeto Integrado de Habitação Evolutiva em Portugal* (DEC, UPorto), 66-67).

Os projetos realizados pelo movimento modernista e as discussões que geraram foram de suma importância não apenas para o desenvolvimento do conceito da arquitetura evolutiva, mas para o desenvolvimento da disciplina da arquitetura como um todo. As implicações, de tão profundas, geraram mudanças significativas por todo o mundo, principalmente naquilo que se refere aquelas à padronização e industrialização na indústria da construção civil. Adentrando que se diz respeito à arquitetura evolutiva, especificamente, em meados dos anos 1960 se observou uma retomada desse assunto na Europa. Van Broek e Bakema, ex-professores da Faculdade de Arquitetura da Universidade de Delft, idealizaram o protótipo das Casas Expansíveis (1963) para a cidade de Cameroon na Holanda (Rangel, Bárbara 2013, 83–84). Essas casas eram basicamente um modelo de casas evolutivas em banda que podia receber compartimentos em um jardim frontal e em um jardim traseiro, além de também poder receber um compartimento acima do pavimento térreo (Fig. 16 e 17). Isso fez com que o núcleo-base, que tem 85m^2, pudesse chegar a 130m^2 (Schneider e Till 2007).



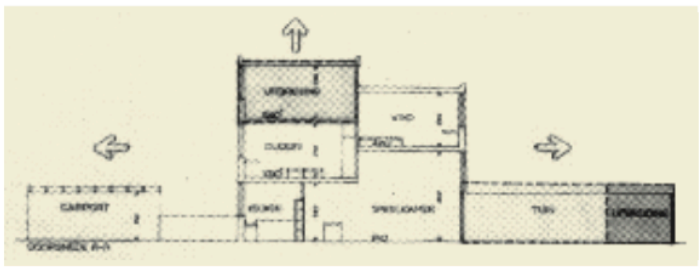
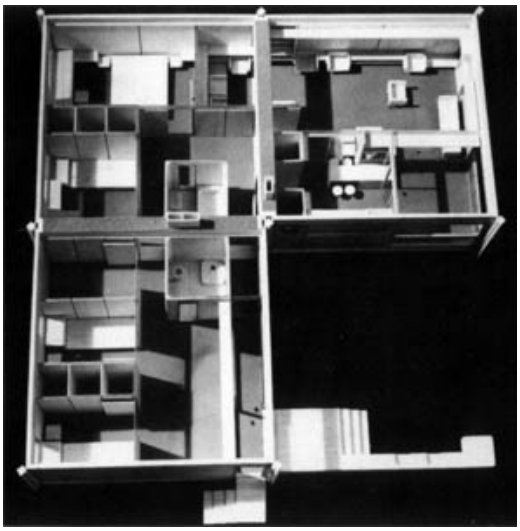


Fig. 16 e 17: Maquete das Casas Expansíveis; Planta das Casas Expansíveis.

(Figura de Tatjana Schneider e Jeremy Till, 2007, *Flexible Housing* (Archictectural Press, Elsevier), 22).

Posteriormente, em 1967, Van Broek e Bakema conceberam o projeto da *E.C.C.S. Steel Housing, Square L-TYPE System*. Segundo Rangel, Bárbara (2013, 85), esse modelo se caracteriza por ter uma unidade base T1, sendo que essas unidades permitem flexibilização interna e podem ser associadas a outras unidades, gerando distintas formas ao ser associado às construções vizinhas (Fig. 18 e 19).



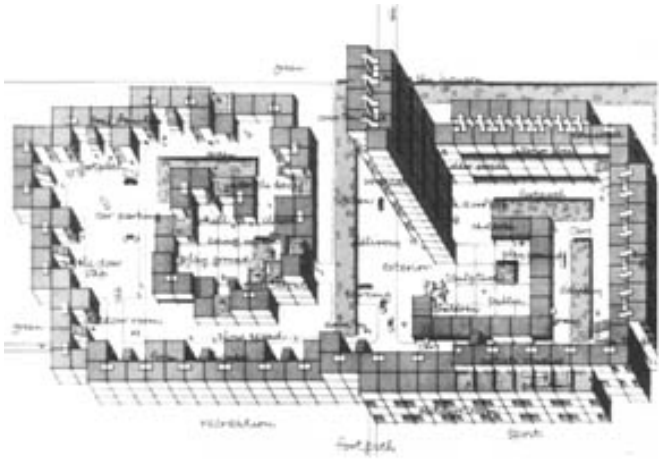


Fig. 18 e 19: Maquete da *E.C.C.S. Steel Housing*; Possibilidade de arranjo da unidade de vizinhança da *E.C.C.S. Steel Housing*.

(Figura de Bárbara Rangel Carvalho, 2013, *Proposta Metodológica para o Desenvolvimento do Projeto Integrado de Habitação Evolutiva em Portugal* (DEC, UPorto), 85).

O modelo da *E.C.C.S. Steel Housing, Square L-TYPE System* inevitavelmente nos remete ao célebre Habitat 67, de Moshe Safdie. Por mais que esse modelo de 158 moradias não tenha capacidade de flexibilização interna, cabe a menção devido ao facto de que sua forma orgânica foi gerada a partir da junção de 314 módulos pré-fabricados, esses que são de 18 tipos diferentes, sendo todos com estrutura de concreto pré-moldado reforçado (Fig. 20 e 21). Ao passo que cada uma das moradias possui uma tipologia e uma conformação específica, o resultado final é um combinado orgânico de preenchimentos e vazios, onde se formam distintos *decks* e jardins externos (Smith 2010, 35).

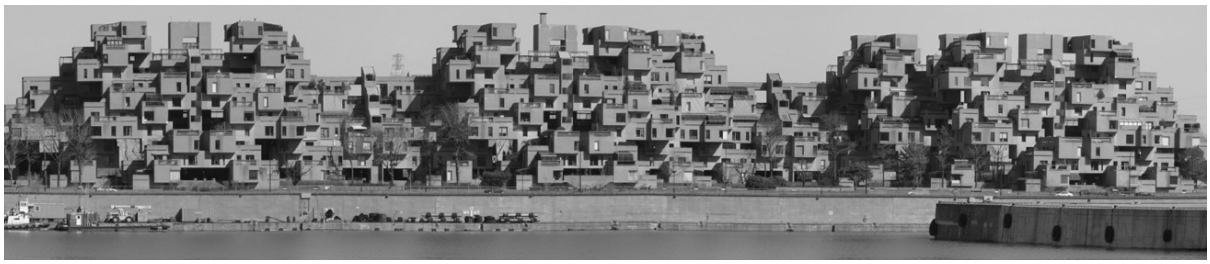


Fig. 20: *Habitat 67*.

(Figura de Bárbara Rangel Carvalho, 2013, *Proposta Metodológica para o Desenvolvimento do Projeto Integrado de Habitação Evolutiva em Portugal* (DEC, UPorto), 85).

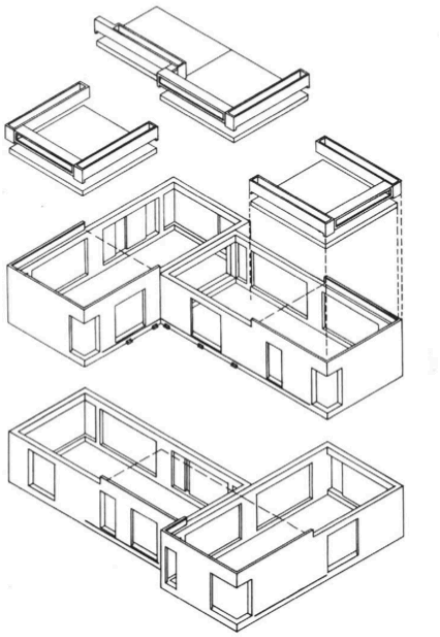


Fig. 21: Esquema de montagem de moradia do *Habitat 67*.

(Figura de Ryan E. Smith, 2010, *Prefab Architecture – A guide to modular construction and design* (John Wiley & Sons), 30).

Outro arquiteto de notável trabalho referente às habitações evolutivas nos anos 1960 foi Richard Rogers. Após conceber a *Roger's House* (1968-1969), um modelo que segundo Rangel, Bárbara (2013, 85–86) consistia de módulos pré-fabricados organizado por uma malha simples que permitia uma organização lógica dos espaços abertos e fechados, conjuntamente com Norman Foster, Su Brumwell e Wendy Cheeseman (Team 4), conceberam a *ZIP House*. Segundo Rangel, Bárbara (2013, 86–88), um dos fatores notáveis desse projeto evolutivo pré-fabricado é o uso de peças de andaimes em sua base e a disposição das infraestruturas sob o piso (Fig. 22, 23 e 24). Esses fatores, além de gerarem uma imensa possibilidade de flexibilizações internas, fazem com que esse modelo de habitação possa ser instalado em diversos terrenos. Ademais, segundo Smith (2010, 35), outro fator característico são os materiais, uma combinação de painéis sanduíche de alumínio superisolados e faces envidraçadas, que geram um *design* tubular e permite subdivisões internas.

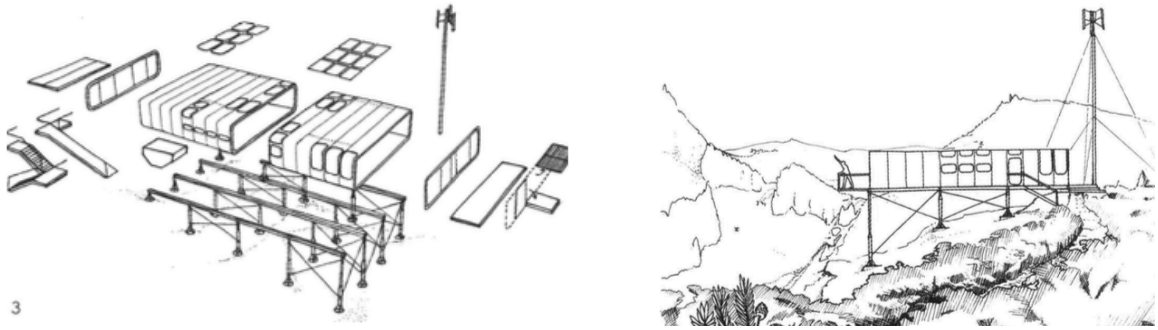


Fig. 22 e 23: Esquema de montagem dos módulos e componentes da *ZIP House*; Croqui da *ZIP House* em terreno desnivelado.

(Figura de Bárbara Rangel Carvalho, 2013, *Proposta Metodológica para o Desenvolvimento do Projeto Integrado de Habitação Evolutiva em Portugal* (DEC, UPorto), 88).

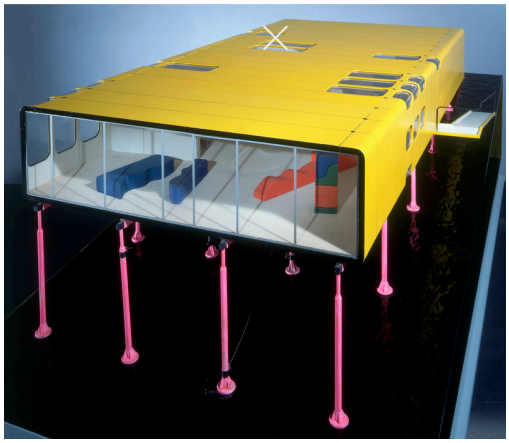


Fig. 24: Maquete da *ZIP House*.

(Figura de RSHP, 2024, https://rshp.com/projects/residential/zipup-house. Acedido em 25 de julho de 2024).

- A HABITAÇÃO EVOLUTIVA E OS USUÁRIOS

Naquilo que diz respeito à participação dos usuários no processo de personalização de sua morada, o arquiteto holandês John Habraken foi uma grande autoridade do assunto. Em seu livro *"Suportes, uma alternativa para a habitação em massa*", Habraken introduziu uma valiosa abordagem focada na separação dos elementos da construção, onde *"(...) argumenta que o "suporte" ou edifício base deveria ser claramente definido a partir do "conteúdo" ou preenchimento interno em construção residencial e design"* (Schneider e Till 2007). Segundo Rangel, Bárbara (2013, 34),

> *"(...) A casa divide-se em duas entidades distintas: o CONTENTOR/SUPORTE, um tabuleiro composto pela estrutura e as infraestruturas, propriedade da comunidade, complementada pelos elementos construtivos, o CONTEÚDO, propriedade da família. Aos projetistas cabe conceber o CONTENTOR/SUPORTE e definir as regras de evolução para articular o CONTEÚDO, ao habitante cabe decidir quando é feita essa evolução. Faseando a construção, reduz-se o investimento de e diminui-se o tempo de construção."*

Pode-se dizer que o mais notável das considerações de Habraken é o facto de que esse sistema de suporte e preenchimento de um edifício não pode ser encarado simplesmente como uma solução técnica, mas para servir a um fim, que é o empoderamento do usuário na customização e utilização de sua moradia.

Através das tecnologias de flexibilização *"Hard"* e *"Soft"* ("rígida" e "suave") formuladas por Schneider e Till (2007, 6), pode-se dizer que um caminho interessante a ser tomado no Caso de Estudo seria a criação de um Modelo Paramétrico "rígido". Enquanto a primeira diz que *"hard tecnologies are those that have been developed specifically to achieve flexibility*" ("tecnologias rígidas são aquelas que são especificamente desenvolvidas para atingir flexibilidade") (Schneider e Till 2007, 7), a segunda é mais aberta, visto que permite ao usuário poder alterar componentes construtivos como bem entender e *"appropriate the space as they see fit"* ("apropriar do espaço como eles vêem") (Schneider e Till 2007, 7). Ciente disso, soa interessante a criação de um Modelo Paramétrico com predefinições e certa rigidez, seja no número de tipologias disponíveis ou em um acervo delimitado de componentes, de forma que as habitações geradas correspondam às expetativas dos usuários através da combinação destes componentes. Ademais, a tecnologia "suave" se contextualiza melhor em casos de edificações residenciais multifamiliares.

Caberá, portanto, a este trabalho a constante reflexão do quão presente está o usuário no papel decisório, considerando que a edificação não pode perder o arcabouço tecnológico que a arquitetura traz, que indica eficiência, mas que também não pode perder a capacidade de ter a "impressão digital" de seu usuário,

para que assim seja estimulado o **sentimento de pertencimento** e sejam gerados produtos que tenham **identificação** com seus usuários.

2.4.2. CONSTRUÇÃO MODULAR E PRÉ-FABRICADA

A priori, há de se definir a construção modular. Segundo Lawson et al. (2014, 1), *"(...) A construção modular (ou pré-fabricada) utiliza estruturas tridimensionais ou unidades volumétricas que são produzidas em fábrica e montados no local para criar edifícios completos ou partes principais de edifícios".* Dessa maneira, estabelece uma crucial diferença defronte ao método mais tradicional de construção, esse que é marcado pela produção *in situ*, utilizando de poucos elementos fabricados, sendo janelas, portas e peças desagregadas de infraestruturas. Lawson et al. (2014, 2) continuam o tema:

> *"(...) A construção modular é geralmente usada para criar edifícios do tipo celular, esses que consistem em compartimentos (**módulos**) de tamanho semelhante, sendo que esses módulos devem ter tamanho adequado para transporte. Os módulos podem ser parcialmente ou totalmente pré-fabricados em uma de suas fachadas, o que faz com que dois ou mais módulos juntos permitam espaços maiores. Unidades modulares também podem ser produzidas em forma de **componentes** de alto valor para o edifício, tais como banheiros, unidades de elevador e escada, unidades com manutenção mecânica e telhados pré-fabricados, muitas vezes incorporando serviços."*

Dessa forma, encara-se esse modelo construtivo não apenas como uma mera união de compartimentos e componentes pré-fabricados, mas uma união de constituintes que sempre devem respeitar uma mesma métrica. Denota-se, portanto, que a construção modular diz respeito à constante coordenação para que as unidades se encaixem e respondam ao propósito desejado.

Ao considerar que, como conferido anteriormente nesse mesmo capítulo, a habitação evolutiva também pode ser planeada segundo uma lógica de somas e reduções de compartimentos com uma métrica predeterminada, há de se pontuar que uma determinada habitação pode ser evolutiva e também modular. Rangel, Bárbara (2013, 48) traz a informação de que

> *"(...) A CONSTRUÇÃO MODULAR EVOLUTIVA é um sistema de construção que permite a evolução da casa em diferentes fases. À primeira corresponde a construção dos elementos de maior dificuldade como a estrutura e a rede das infraestruturas, sistemas que envolvem mão-de-obra especializada e um maior investimento. Para as fases seguintes deve, de preferência, ser deixada a construção de elementos que requerem menor capacidade técnica, de preferência pré-fabricados, como paredes divisórias, acabamentos, instalação de equipamentos específicos, etc."*

Dessa forma, a construção que envolve esses dois conceitos mostra uma clara correlação entre fase construtiva e acréscimo de novos módulos. Traz como benefícios, além do envolvimento do usuário e adaptação à sua vida, a racionalização do processo e ainda a industrialização, que segundo Lawson et al. (2014, 4) podem ter seus benefícios vistos *"(...) em determinados sectores de mercado onde existe uma demanda por velocidade de construção e economia na fabricação, ou onde reduzir a perturbação do processo de construção é requisito importante para um negócio ou plano."*

- ENQUADRAMENTO HISTÓRICO

Pode-se dizer que a história da construção *off-site* (pré-fabricada) remonta a um período longínquo e inexato, onde o homem teve a necessidade de produzir peças e componentes fora do sítio de inserção

devido a fatores funcionais. No entanto, a origem da produção pré-fabricada em escala pode ser determinada de uma forma mais exata. Ryan E. Smith, professor da Faculdade de Arquitetura da Universidade do Arizona, fez um levantamento histórico em seu livro *Prefab Architecture – A guide to modular design and construction* (2010) e destacou que essa origem remonta a aproximadamente quinhentos anos. O agente executor foi o Império Britânico, esse que durante o período colonizador produzia habitações em seus domínios e as transportava para a América do Norte, África, Oceania e Ásia. Tal modelo produtivo deve-se ao facto de não serem acostumados aos materiais encontrados em suas colónias, segundo Smith (2010, 5). Ainda segundo Smith (2010, 5), o primeiro desses casos é do ano de 1624, onde casas com estrutura e painéis de vedação em madeira foram produzidas na Inglaterra e enviadas para uma vila pesqueira situada no atual estado de Massachussets.

Trezentos anos após, ainda em uma das colónias britânicas, dois intervenientes tomaram passos importantes sobre o modelo de venda de habitações como conhecemos hoje. Segundo Smith (2010, 10), com o desenvolvimento trazido pela criação de ferrovias, os irmãos W.J. and O.E. Sovereign criaram a *Alladin*, que se tornou a pioneira em comercializar sistemas de madeiras previamente cortadas para a produção de casas-balão *(ballon-framed homes)*. Posteriormente surgiu a *Sears Roebuck*, essa que trouxe a possibilidade de venda de casas que podiam receber atualizações *(upgrades)*, além de interessantes opções de financiamento. No entanto, por mais que ambas empresas tenham tirado partido da experiência de envio e obtido relativo sucesso à época, ambas acabaram por perder forças devido à Grande Depressão, evento dilacerante que impactou a economia mundial nos anos 1930.

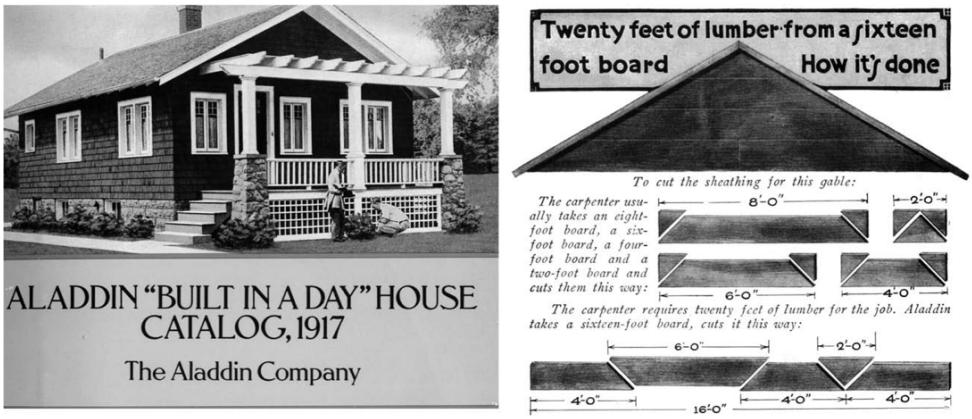


Fig. 25: Prospecto da *The Alladin Company*.

(Figura de Ryan E. Smith, 2010, *Prefab Architecture – A guide to modular construction and design* (John Wiley & Sons), 10).

Na década seguinte, no período pré-segunda guerra mundial, pode-se considerar que o Fordismo influenciou grandemente a produção *off-site*. Smith (2010, 12) aborda esse assunto ao trazer a informação de que empresas como a *General Houses Corporation* usavam partido da padronização, assunto em voga, assim permitindo que casas fossem montadas como um automóvel. Na Europa, a indústria automobilística também exerceu forte influência naquilo que se refere ao processo da montagem. Esse movimento teve como expoente máximo Le Corbusier, que segundo Smith (2010, 30) acreditava o arquiteto deveria configurar o sistema da construção utilizando a racionalização através da padronização. Ainda sobre Le Corbusier, segundo Rangel, Bárbara (2013, 80-81),

> *"(...) A casa deveria ser concebida como um automóvel, mutável e sistematizado, liberto das tradições que a sociedade vinha a impor, princípios estes sintetizados por Corbusier em Vers une architeture (Le Corbusier):*
>
> *1. PLANTA LIVRE, a estrutura deveria ser independente da divisão espacial;*

2. FACHADA LIVRE, a estrutura deveria separar-se da fachada para permitir uma maior liberdade de conceção;
3. JANELAS HORIZONTAIS, a fachada livre permitiria a conceção de extensos vãos horizontais.

Do ponto de vista urbano, a base e o topo do edifício tinham também novos entendimentos:

1. PILOTIS, o edifício deveria elevar-se do chão sobre os pilares, permitindo o trânsito por debaixo do edifício.
2. TERRAÇO JARDIM, a cobertura passaria a ser um espaço de lazer comunitário."

Em seu livro, Smith (2010, 12) traz a informação de que nesse mesmo período, a empresa estadunidense *Fisher*, fortemente influenciada pela engenharia aeronáutica, desenvolveu um sofisticado painel sanduíche metálico para as paredes de suas habitações, além um *design* que permitia o intercâmbio de peças de diferentes fabricantes, popularizando ainda mais seus modelos.

Ainda segundo o autor Smith (2010, 13), no período pós-guerra, se observou mudanças na tecnologia das construções industrializadas, introdução de uso de novos materiais e aumento do uso de outros (pode-se dizer que a maior utilização de metais foi determinante nesse momento). No entanto, naquilo que se diz respeito à construção industrializada, o campo social e empresarial teve maior evolução do que o tecnológico, onde diversos programas de habitação ganharam força nos Estados Unidos e Europa. Posteriormente, nos Estados Unidos se observou a criação e difusão de um diferente modelo de construção industrializada: as casas móveis (Fig. 26). Munidas de um chassi com rodas, eram transportadas por camiões ao local das habitações. Embora tenham recebido críticas da comunidade de arquitetos devido ao facto de sua estruturação ser mais frágil e de ser pouco personalizável, em 1968 se tornou o modelo utilizado por 1/4 dos estadunidenses segundo Smith (2010, 15), prova de que alguns de seus atributos corresponderam às demandas de um público de menor poder aquisitivo.



Fig. 26: Casa móvel do final dos anos 70.

(Figura de Ryan E. Smith, 2010, *Prefab Architecture – A guide to modular construction and design* (John Wiley & Sons), 15).

Pode-se dizer que, salvas as evoluções de componentes e materiais, ainda se produzem casas pré-fabricadas como antes. No entanto, ao longo dos últimos anos cresceu a preocupação com o impacto ambiental: facto trazido por Lawson et al. (2014, 16) ao apontar na maioria dos países desenvolvidos, o ambiente construído responde por mais de 40% do uso total de energia. Isso fez com que a Comissão Europeia, através da sua diretiva *Energy Performance of Buildings* (performance energética dos edifícios), lançasse luz sobre esses factos e buscasse a redução do consumo a fim de reduzir as emissões de CO_2 (Lawson, Ogden, and Goodier 2014, 16). Ademais, também cresceu a preocupação sobre a

eficiência do processo de fabricação, a otimização dos recursos e o pós-vida da edificação, factos que estão expostos no subcapítulo sobre *DfMA* (2.4.3).

Ademais, há uma crucial diferença no processo de desenho e no processo de contato entre as equipas de desenho e de produção. Segundo Smith (2010, 18), a introdução dos sistemas CAD-CAM (computadores auxiliando no *design* e computador auxiliando na modelação) aliados ao desenvolvimento de maquinários CNC (controle numérico computadorizado) provocou uma quebra de paradigma na produção *off-site*, gerando uma nova forma de se projetar, respondendo demandas contemporâneas como menor utilização de insumos, menor geração de resíduos, maior economia e maior velocidade de produção.

Segundo Smith (2010, 18–19), os fatores principais que desencadearam esse movimento são o desenvolvimento de computadores com maior processamento e de custo mais baixo que passaram a processar dados de forma cada vez mais rápida, o desenvolvimento de *softwares* que fazem o processo de fabricação digital mais acessível e intuitivo, e o entendimento de como a geometria pode se relacionar à produção através de coordenadas e números.

- PROBLEMÁTICAS E DESAFIOS DA CONSTRUÇÃO PRÉ-FABRICADA NA ATUALIDADE

A construção pré-fabricada surgiu em um contexto de interesse de melhorar a performance da construção tradicional e dar resposta a uma necessidade urgente de reconstrução e novas construções nos períodos pós-guerra. No entanto, embora muitos componentes e elementos construtivos já sejam produzidos industrialmente, como por exemplo os caixilhos e portas, ainda hoje o sector da construção não atingiu a indústria 4.0 como os restante sectores de produção.

Segundo Abd Razak et al. (2022), os sistemas de construção industrializada bem aplicados podem ajudar a reduzir o tempo, aumentar a qualidade e reduzir a dependência da mão de obra não qualificada. No entanto, um conservadorismo na indústria da construção impede que esses sistemas e seus ganhos sejam vistos com mais frequência. Intervenientes constantemente se mostram relutantes para inovar (Qi et al. 2021), o que cria um ciclo vicioso: enquanto é baixo o número de projetos industrializados validados em cenários distintos, facto que traz desconfianças aos intervenientes, os mesmos não querem se arriscar em usar sistemas inovadores. Isso consequentemente estagna o aumento do número de construções industrializadas, fazendo com que a quantidade de trabalhos análogos permaneça limitada (Qi et al. 2021).

Sobre aqueles que se arvoram no meio industrializado, há o enfrentamento de percalços: constrangimentos devido a questões técnicas específicas e limitada interoperabilidade de informação (devido ao uso e de *softwares* e máquinas diferentes) (Qi et al. 2021); constrangimentos com cronograma, custos e dependência de mão de obra não qualificada (Abd Razak et al. 2022); e a desvalorização das casas feitas em fábrica pelo público devido a seu maior custo de aquisição e maior depreciação quando comparadas às casas feitas de forma tradicional (M. Panjehpour e A. A. Abang Al 2013). Outro percalço são os estigmas vinculados às habitações pré-fabricadas: algumas pessoas acreditam que o transporte da fábrica ao sítio de construção pode gerar instabilidades na estrutura (M. Panjehpour e A. A. Abang Al 2013) e outros tem uma percepção negativa quanto à estética. Segundo Dayne W. Kenny et al. (2022),

> *"(...) as pessoas têm uma noção pré-concebida sobre construções pré-fabricadas que as leva a acreditar que os edifícios construídos são de caráter predeterminado e repetitivo, com pouca variabilidade, sem exclusividade e com menor atração visual arquitetônica."*

Essa noção pré-concebida notoriamente tende a causar uma desvalorização dos edifícios pré-fabricados, visto que outros sectores da indústria são muito mais reconhecidos pelos esforços em proporcionar mais

opções de personalização para se adequar aos diferentes gostos dos clientes. Por conta disso, urge a necessidade das empresas de desenvolver componentes e entregar ao usuário um maior leque de possibilidades de volumetrias, materiais de revestimento e aberturas, além de investir na divulgação para melhor conscientização do público.

Um trabalho revisional no campo da construção pré-fabricada foi realizado por Qi et al. (2021), pesquisadores das Universidade da Flórida e da Universidade do Estado de Nova Iorque. Buscaram entender em mais de uma centena de livros e artigos o *status quo* do efeito das tecnologias emergentes na construção industrializada, além de apontar os constrangimentos que a mesma enfrenta atualmente.

A priori, apontaram que se poderia estruturar as informações encontradas em quatro campos distintos: "tipo de tecnologia", "fase do projeto", "sistema estrutural" e "benefícios e desafios". No que se refere ao campo "tipo de tecnologia", viram que as tecnologias emergentes se relacionam (ou podem se relacionar) com a construção industrializada em quatro setores:

- **Digitalização do negócio:** atualmente a construção industrializada se distancia de um passado com empresas "baseadas no papel". Além da já conhecida presença do CAD na rotina das empresas, é cada vez maior a utilização de da bancos de dados em nuvem para trocas de documentos e coordenação entre diferentes setores;
- ***Design* integrado ao computador:** 4D e BIM são largamente aplicados para melhoria da qualidade dos projetos e da logística da montagem;
- **Aquisição de dados, otimização e análises preditivas:** algoritmos de otimização e previsão vêm sendo empregados na indústria, além de sistemas *IoT*;
- **Robótica e automação:** a crescente utilização de robôs em linhas de montagem, maior apelo à fabricação digital e maquinário autónomo mostram notáveis esforços nesse setor.

Ao passo que o campo "fase de projeto" apresenta certa fragmentação e descontinuação entre equipas, apresentaram os seguintes desafios e potencialidades tocantes à mesma:

- ***Design*:** a integração de DfMA pode ajudar a mitigar problemas usuais, como a intepretação do produto modular não apenas sob a ótica da funcionalidade e performance, mas também da produção, transporte e montagem;
- **Planeamento:** devido ao seu *workflow* diferenciado, a etapa de planeamento da construção industrializada (geralmente cíclica) requer uma análise mais sofisticada em comparação com os métodos tradicionais de planeamento de construção;
- **Produção e fabricação:** a etapa de fabricação da construção industrializada tem muitos problemas a serem resolvidos, como a falta de inspeção da qualidade da produção em tempo real, o alto consumo de energia e a falta de segurança do espaço de trabalho. Sem a ajuda de tecnologias avançadas, é bastante desafiador obter uma produtividade ideal nas linhas de produção.

Outro trabalho de revisão sistemática realizado, esse executado por Lim et al. (2022), buscou mostrar desafios e possíveis caminhos de pesquisa para o futuro no escopo da construção modular. Através de critérios meticulosamente pensados e a revisão de importantes trabalhos da temática na atualidade, chegaram a quatro grandes campos que permitem realizar uma análise da área como um todo:

- **Viabilidade da Construção Modular *(Feasible aspects of modular construction)*:** diz respeito às políticas, aos *players*, aos custos e benefícios e às vantagens e desvantagens contra a construção tradicional;
- **Tipos de material de construção *(Types of construction of materials)*:** diz respeito aos materiais e suas qualidades;
- **Planeamento da Construção *(Construction Planning)*:** diz respeito à tecnologia usada no *design* e planeamento, às otimizações, sustentabilidade e transporte dos componentes;

- **Análise de *design* e estrutura *(Design & Structural Analysis)*:** diz respeito às propriedades mecânicas, junções dos elementos e segurança contra fogo e abalos.

Após apresentarem os pormenores dos temas, posteriormente elaboraram uma estrutura de pesquisa para futuras pesquisas e desenvolvimentos da construção modular (Fig. 27).

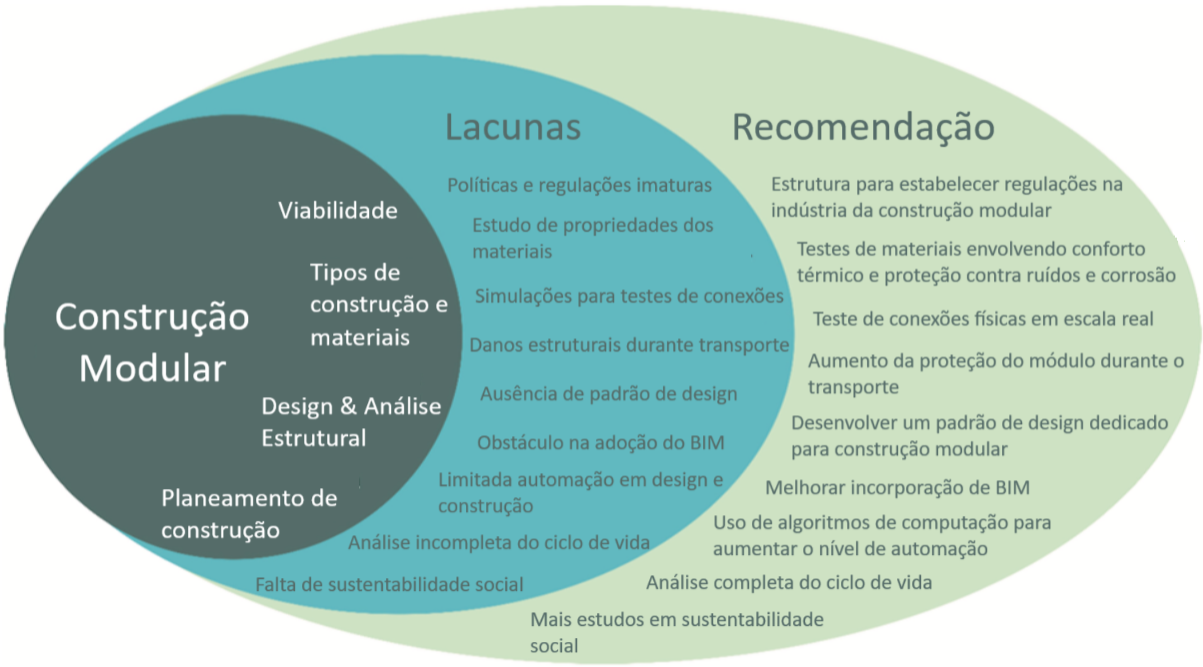


Fig. 27: Estrutura para futuros estudos e desenvolvimentos no meio da construção modular.

(Figura de Lim et al., 2012, *Planning and coordination of modular construction* (Automation in Construction), 11).

A fim de se resolver tais problemas e derrubar a desconfiança que o mercado vê as tecnologias emergentes, é notória a necessidade de mais estudos e experimentos a fim de validar ideias e conjugar conceitos. Assim seria aberta o caminho para se aproveitar dos benefícios que a construção industrializada promete trazer. Alguns dos benefícios, segundo Lawson et al. (2014, 7–8) seriam:

- Tempo de construção em obra mais curto, o que leva à redução dos custos de gerenciamento e ao retorno antecipado do investimento;
- Controle de qualidade superior alcançada pelo processo de construção fabril e pelas verificações antes da entrega;
- Economia ao produzir em escala, principalmente em projetos maiores ou em projetos repetidos que usam a mesma especificação modular;
- Custo de projeto reduzido para o cliente decorrente da tipificação de situações;
- Uso de sistemas leves e secos, o que leva a menor desperdício em comparação com a construção tradicional, alem de maiores oportunidades de reciclagem;
- Aumento da produtividade na produção da fábrica e redução da necessidade de mão de obra *in situ*;
- Menos perturbação da vizinhança durante a construção;
- Capacidade de decompor o edifício em elementos e manter o valor patrimonial caso interesse reutilizar os módulos em outra edificação.

- FUNDAMENTOS DA CONSTRUÇÃO PRÉ-FABRICADA

Ryan Smith, além de apresentar informações acerca da história da construção pré-fabricada, também traz em seu livro uma bem detalhada organização das regras da construção industrializada, nomeadamente sobre materiais, formas, produção e distribuição do componente. Estão dispostos no capítulo dos Fundamentos (Smith 2010, 99–126) as seguintes categorias:

- **Sistema:** Estrutura, envoltória, serviços, espaço, sítio;
- **Material:** madeira, metal/alumínio, concreto, polímero/compósito;
- **Método (fabricação):** usinagem, moldagem e montagem;
- **Produto:** feito para estocar, montado para entregar, organizado para entregar;
- **Classe:** aberto versus fechado;
- **Grelha (ou malha):** axial e modular.

A coordenação de todo esse material é essencial para atender aos requisitos funcionais da construção modular, que segundo Lawson et al. (2014, 18) são: forma da planta, circulação, revestimento, cobertura, isolamento térmico, isolamento acústico, segurança contra incêndio e distribuição dos serviços.

As informações referentes ao capítulo de Fundamentos do livro de Smith (2010, 99–126) com maior potencial de agregar no Caso de Estudo foram sintetizadas:

- SISTEMA

Smith (2010, 99–107) traz, a priori, uma decomposição do edifício em cinco camadas (Fig. 28). Posteriormente destrincha as informações sobre quatro delas (estrutura, envoltória, infraestruturas (ou serviços) e espaço. Tal conteúdo não apenas ajuda a entender sobre os componentes envolvidos, mas também ajuda a entender quais se relacionam diretamente, isto é, quais podem ser trabalhados de forma agregadas e quais não podem.

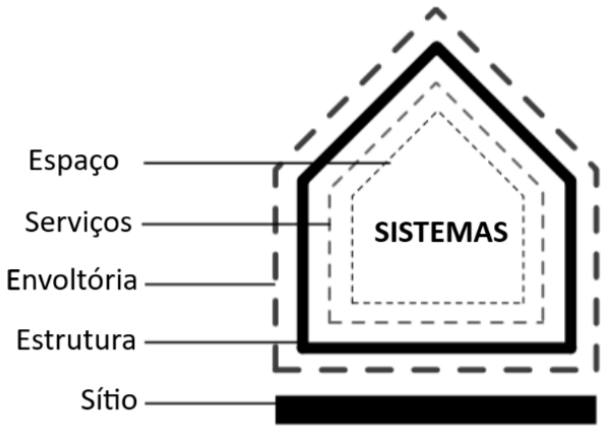


Fig. 28: Demonstração dos cinco diferentes sistemas presentes em uma construção pré-fabricada usual.

(Figura de Ryan E. Smith, 2010, *Prefab Architecture – A guide to modular construction and design* (John Wiley & Sons), 100).

- ESTRUTURA

No que se diz respeito aos sistemas de estruturas, Smith (2010, 100) pontua que há dois tipos principais na construção industrializada:

i: Estrutura de massa: é maciça, o que quer dizer que é estruturalmente mais resistente e de transporte mais complexo devido ao peso. É menos comum.

ii: Estrutura de quadros: é a mais corrente, onde a estrutura funciona como um esqueleto circundante às vedações, contendo pilares e vigas. São feitas com materiais suficientemente resistentes e têm o interior vazio. As estruturas de quadro podem ser classificada em três grupos (Fig. 29): *Brace frame* (quando a vedação possui a estruturação em X ou *Chevron*), *Shear wall* (quando o encontro de pilares e viga possui uma estruturação adicional para provir melhor comportamento aos esforços laterais e superiores) e *Rigid frame* (modelo bastante usual onde a vedação é independente da estrutura principal).

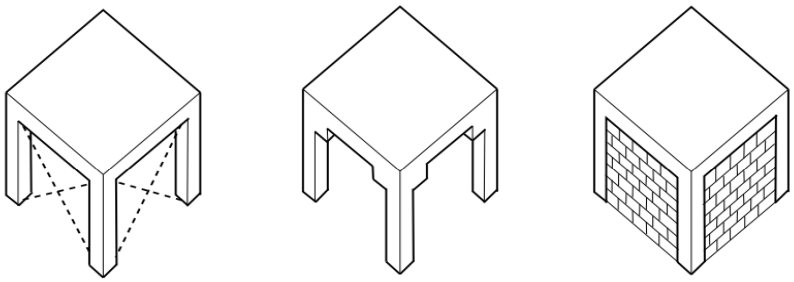


Fig. 29: Da esquerda para a direita: *Brace frame*, *Shear wall* e *Rigid frame*.

(Figura de Ryan E. Smith, 2010, *Prefab Architecture – A guide to modular construction and design* (John Wiley & Sons), 100).

- ENVOLTÓRIA

Smith (2010, 103) dispõe que os sistemas de envoltórias devem respeitar as seguintes condicionantes:

- **Função:** propósito pragmático da epiderme (conforto, proteção, vista);
- **Construção:** elementos da edificação e como são montados;
- **Forma:** estética da edificação, aspetos culturais e contextuais;
- **Meio ambiente:** performance do edifício em seu ciclo de vida.

Dessa maneira, ao se considerar todo o contexto técnico, social e ambiental, as envoltórias ganham um patamar elevado no escopo da construção, se tornando um sistema intimamente integrado à localidade.

- INFRAESTRUTURAS

Smith (2010, 106) assinala que os sistemas de infraestruturas de uma edificação podem conter aquecimento, ventilação, tubulações, dutos elétricos e outros equipamentos convenientes como elevadores. Ademais, traz para o contexto da construção industrializada ao apontar que certos serviços podem ser organizados e entregues de forma fechada ao edifício sob a forma de módulos ou componentes, o que requer um alto nível de unidade e coordenação na etapa de projeto.

- ESPAÇO

No que tange o sistema referente ao espaço, Smith (2010, 106) se refere aos materiais na interface interna da habitação, ou seja, um dos principais elementos que influenciam a experiência espacial pelo usuário.

- MÉTODO (FABRICAÇÃO)

O método de fabricação pode ter processos de usinagem, moldagem e montagem.

- USINAGEM

Segundo Smith (2010, 118–119), é o processo de retirar material através de uma operação mecânica. As ferramentas mais comuns são serras, brocas, talhadeiras e rotadores. Destaca-se também o trabalho feito pelos equipamentos *Routers* CNC, que podem funcionar por jato de água, plasma, brocas e laser.

- MOLDAGEM

Smith (2010, 119–121) estabelece que a moldagem é o processo que engloba trabalhos de deformação, fundição e prensagem. Trabalhos de perfuração em casos específicos podem ser incluídos nesse grupo.

- MONTAGEM

A montagem é a operação final, segundo Smith (2010, 121–122), onde são juntados os elementos básicos (incluindo provenientes da usinagem e moldagem) para se criar um componente construtivo específico. Essa soma de elementos pode ser feita de três maneiras:

- **Mecânica:** utiliza parafusos, abraçadeiras, rebites, pregos e grampos. Tão importante quando esses conectores, é a preparação da peça para recebê-los. Esse tipo de estratégia é conveniente no que se diz respeito à desmontagem.
- **Soldagem:** utiliza do calor para realizar a junção elementos. A soldagem pode ser utilizada em contextos estruturais ou de cargas pesadas.
- **Adesivos:** os elementos são agrupados através de cola. São mais comuns em vidros, cerâmicas, madeiras e polímeros, embora já existam adesivos para contextos estruturais específicos. Geralmente não permite fácil desmontagem e reciclagem.

Um mesmo componente pode levar os três processos, que podem ser executados por máquinas ou trabalhadores. Segundo Lawson et al. (2014, 226–27), a montagem pode ser feita de forma estática (os operários levam os componentes ao "esqueleto" do módulo e o montam), linear (funciona como a indústria automotiva, em que o módulo é movido por trilhos entre diferentes equipas de especialidades de montagem) e linear semi-automatizada (é como a linear, porém tem mais estágios dedicados, tendo linhas somente para a produção de paredes, coberturas e painéis de piso).

- PRODUTO

Os produtos podem ser classificados de acordo com o seu grau de personalização (Fig. 30). Esse grau varia se são fabricados para serem estocados ou para serem enviados imediatamente para obras (Tab. 03). A maior customização tende a gerar maior tempo de produção e custo.

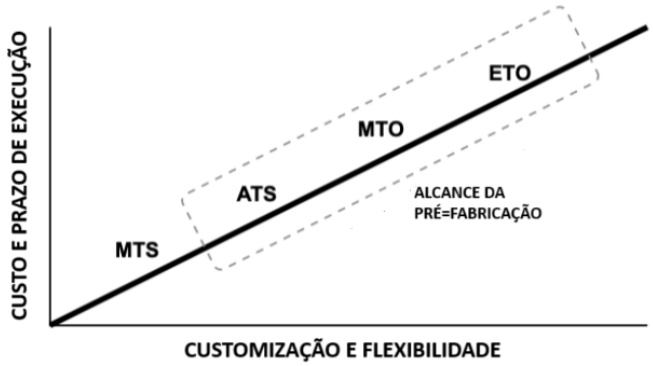


Fig. 30: Gráfico de custo e tempo de produção por grau de customização e flexibilidade. Observa-se no quadrado tracejado o domínio da produção *off-site* (ATS, MTO e ETO).

(Figura de Ryan E. Smith, 2010, *Prefab Architecture – A guide to modular construction and design* (John Wiley & Sons), 122).

Tab. 03: Compilação de informações sobre produtos e fabricação (Smith 2010, 122–24).

	Feito para estoque (MTS)	Montados para estoque (ATS)	Feito por encomenda (MTO)	Projetado sob encomenda (ETO)
Informações relevantes	Produtos MTS são produzidos para reposição de inventários. São padronizados, repetitivos e têm complexidade diminuída.	Produtos ATS partilham de semelhanças com o MTS, mas possuem o diferencial de terem o conceito da customização. Dessa forma, podem ser também uma composição de outros produtos MTS ou mesmo ATS.	Produtos MTO são feitos para chegar no sítio de construção em um momento exato. São pensados para cumprir uma demanda específica do cliente. Requerem mais tempo para produção devido às especificidades.	Produtos ETO são os mais complexos, caros e de produção mais demorada, visto que diferente dos produtos MTO, são ainda mais customizados por não fazem parte de uma linha de produtos específica.
Exemplos	Elementos feitos em chapa de madeira, aço, alumínio, telhas cerâmicas e painéis como gesso ou madeira laminada.	Elementos em padrões internacionais e habitações móveis pré-fabricadas.	Portas personalizadas, janeias e outros elementos customizados de acordo com uma linha específica.	Elementos premoldados, fachadas e outras construções por especificação.

- CLASSE

A classe diz respeito ao fabricante dos produtos (elementos) construtivos e se há ou não mais de um fabricante envolvido no mesmo elemento. Segundo Smith (2010, 124), há duas classes:

  - Fechada: Nesse modelo, um único fabricante é responsável pela produção do começo ao fim. O fabricante pode produzir edifícios inteiros ou edifícios parciais (como POD's 3D), que devem ser devidamente coordenados com sua estrutura de suporte na obra;
  - Aberta: Nesse modelo, há a possibilidade de combinar produtos ou elementos feitos por diversos fabricantes para criar um produto específico. Em muitos casos, os produtos constituintes podem ser do modelo fechado.

- GRELHA

Segundo (Smith 2010, 125), *"(...) as grelhas são um sistema geométrico de organização que permite que componentes de construção e elementos pré-fabricados tenham dimensões padronizadas."* Dessa maneira, necessitam de constante atenção ao longo do processo, visto que ditam a métrica da edificação modular. Smith (2010, 125) divide as grelhas em axiais e modulares (Fig. 31 e Tab. 04).



Fig. 31: Na esquerda (grelha axial) se observa como se organiza a construção de acordo com o eixo central dos elementos estruturais. Na direita (grelha modular) se percebe como se organiza as construções de acordo com a face externa.

(Figura de Ryan E. Smith, 2010, *Prefab Architecture – A guide to modular construction and design* (John Wiley & Sons), 125).

Tab. 04: Compilação de informações sobre as grelhas (Smith 2010, 125–26).

Axial	Modular
Grelhas axiais usam um eixo central do elemento que está alinhado com a malha de referência. São mais utilizadas em contextos estruturais.	Grelhas modulares são baseadas na localização e dimensão dos elementos da construção. Leva em conta seus aspectos em três dimensões (altura, largura e espessura). As grelhas modulares têm uma relação direta com painéis e sistemas modulares.

Smith (2010, 126–127) ainda destaca que um edifício pode ter diferentes tipos de grelhas. Por exemplo, uma grelha axial pode representar a localização e relação entre elementos receptores de carga, enquanto uma grelha modular pode determinar elementos internos. Há também casos onde são projetadas grelhas de serviços, apontando seus elementos.

- HIERARQUIA, PRODUÇÃO E RELAÇÃO ENTRE CONSTITUINTES

Há de se entender que a construção modular possui uma determinada hierarquia. Além de apontar as correlações entre os constituintes, a organização hierárquica também obriga a conceituá-los. Segundo Smith (2010, 127–28), os mais comuns são **módulo**, que se refere à uma junção de **elementos/componentes** em uma escala maior (como um POD 3D); **painel**, que é uma estrutura em 2D contendo **elementos/componentes** (como fachada composta por elementos internos, estruturais e externos); e **elemento/componente**, que é um item básico e pormenorizado (como uma janela, por exemplo) (Fig. 32). No entanto, Smith (2010, 128) toma o cuidado de advertir que esses nomes não são absolutos e não são padronizados pela academia e pela indústria da construção. Sempre são tomados pelos intervenientes da maneira mais adequada ao contexto específico para apresentar a decomposição da construção (por exemplo, em determinado contexto um painel pode ser interpretado como um sistema modular de paredes).

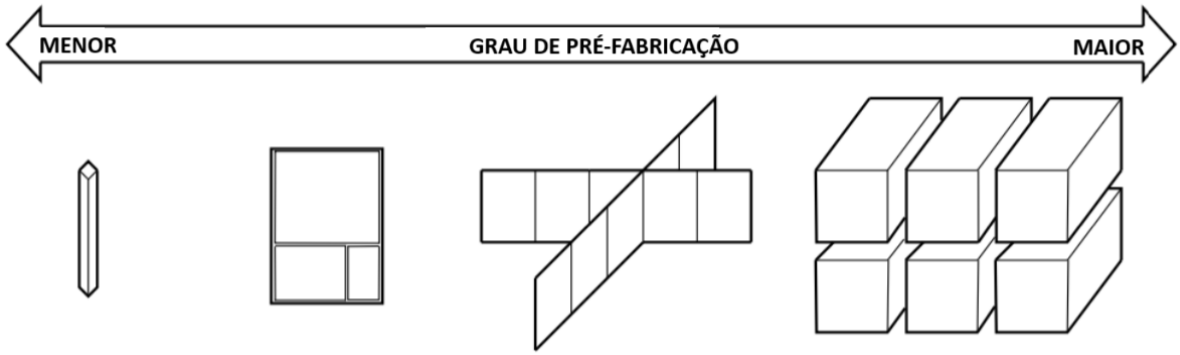


Fig. 32: Da esquerda para a direita: materiais (barra metálica), componente (janela), painéis (2D) e módulos (POD 3D). Geralmente, os benefícios da pré-fabricação podem ser realizados como projetos isolados para atingir maiores graus de pré-fabricação.

(Figura de Ryan E. Smith, 2010, *Prefab Architecture – A guide to modular construction and design* (John Wiley & Sons), 128).

Tais constituintes de uma construção, segundo Smith (2010, 182–83), sempre devem respeitar uma lógica de montagem. As partes *(PARTS)* são os constituintes menores que são feitos de forma *off-site*. São basicamente os produtos "feitos para estoque" (MTS). As submontagens *(SUBASSEMBLIES)* são as junções dessas partes, sendo assim específicas, os produtos "feitos para encomenda" (MTO). A montagem (*ASSEMBLY*) é o ato de unir todas as submontagens no local de construção.

- FUNDAÇÕES

Por fim, Smith (2010, 209) também discorre em seu livro sobre as fundações onde os módulos (ou submontagens) serão pousados. Ele pontua que existem três tipos mais comuns (Fig. 33): fundações por pilares, sapatas lineares ou sapatas contínuas. Os módulos feitos em madeira usualmente distribuem suas cargas ao longo da fundação através das paredes de suporte. Alguns módulos com estrutura de aço se comportam de forma diferente: aplicam cargas pontuais sobre a fundação. Portanto, a laje não é o tipo ideal para esse modelo, sendo mais recomendáveis as fundações perimetrais e de pilares.

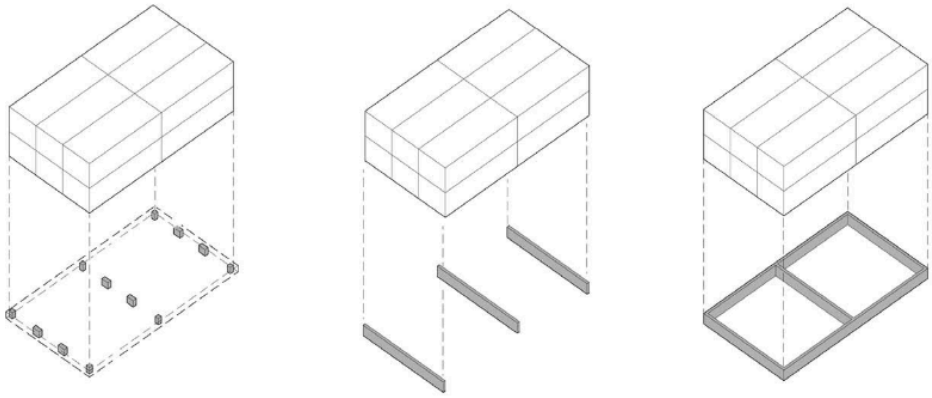


Fig. 33: Da esquerda para a direita: fundação por pilares, fundação por sapatas lineares e fundação por sapatas contínuas.

(Figura de Ryan E. Smith, 2010, *Prefab Architecture – A guide to modular construction and design* (John Wiley & Sons), 210).

É importante de se destacar que, segundo Smith (2010, 209), as fundações executadas *in situ* podem ter imperfeições notáveis, diferentemente das feitas de forma *off-site* que tem um maior grau de exatidão

devido às condições mais controladas. Dessa forma, é comum que sejam utilizados calços para nivelar módulos quando a fundação é feita no local.

2.4.3. DFMA

Ao passo que o ato de desenhar-projetar ficou marcado pela introdução do computador nas últimas décadas, essa disciplina também ficou marcada pelo DfMA, um conceito que segundo Gao et al. (2020) surgiu nos anos 80 e permitiu fortalecer o cruzamento dos campos do *design* e da produção industrial em prol da melhoria da qualidade do produto final.

A priori, cabe pontuar que segundo a revisão sistemática realizada por Gao et al. (2020), o DfMA *(design for manufacturing and assembly)* é uma junção de outros dois conceitos: DfM *(design for manufacturing),* que diz respeito à produção de peças, e DfA *(design for assembly),* que diz respeito a como essas peças serão montadas. Enquanto os autores, o DfM possui como objetivo principal a criação de peças que são mais fáceis, baratas e eficientes de se produzir, enquanto, o DfA mira na simplificação e redução do número de peças para tornar mais prático o processo de montagem. No esquema abaixo trazido pelos mesmos autores (Fig. 34), se permite observar em detalhe a estruturação do processo lógico do DfMA.

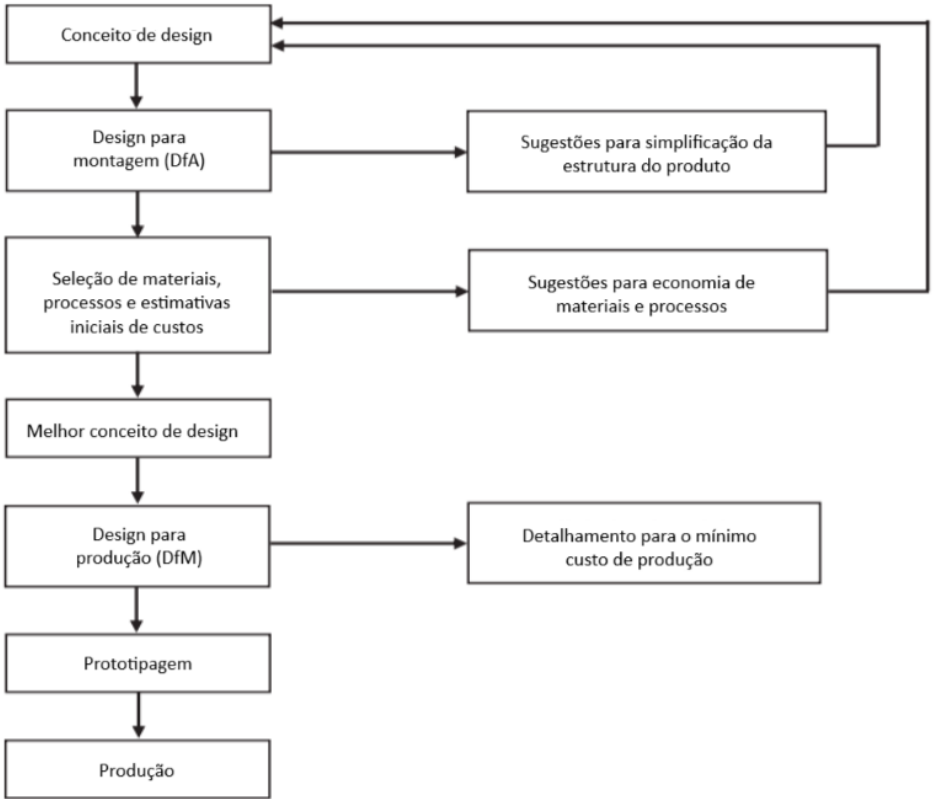


Fig. 34: Esquema lógico do DfMA.

(Figura de Boothroyd G., 2005, *Assembly automation and product design (CRC Press)*.

Gao et al. (2020) interpretaram desse esquema de Boothroyd que:

> *"O DfA deve ser sempre a primeira consideração, levando a uma simplificação da estrutura do produto. Posteriormente vem a seleção económica de materiais e processos e*

> *estimativas antecipadas de custos. Nesse processo, as estimativas de custos do projeto original e do projeto novo (ou melhorado) serão comparadas, a fim de tomar decisões de compromisso. Uma vez finalmente selecionados os materiais e processos, uma análise mais aprofundada do DfM pode ser realizada para o projeto detalhado das peças. Nessa fase, o DfM é auxiliado com diretrizes para padronização, projeto de componentes e montagem de componentes para reduzir o custo total de fabricação."*

Através dessa citação e do esquema acima, também se entende que o DfA tem uma ênfase preliminar. O DfA visa receber as informações do conceito do *design* e, através de seus preceitos, retorna sugestões para a simplificação da estrutura do produto. Dessa maneira, o conceito do *design* envia e recebe informações até que seja compreendido que sob a ótica do DfA tenha sido encontrada a versão de produto de maior simplificação possível. Posteriormente, é buscada a identificação dos materiais e processos mais económicos, repetindo o mesmo processo de aprimoramento do *design*. Quando esse quesito económico é finalmente validado, a informação preliminar é tida como o melhor conceito de *design*. É encaminhada para a etapa seguinte onde o DfM toma espaço, trazendo consigo uma abordagem centrada em economia no processo de produção. Isso tudo converge no protótipo e finalmente na produção em escala. Dessa maneira, o processo do DfMA contempla uma série de etapas iterativas até finalmente se chegar ao produto final.

Ademais, Gao et al. (2020) também trouxeram em sua revisão práticas do DfMA e seus benefícios, essas formuladas por Bogue (2012, 112–18):

Tab. 05: Estratégias e benefícios do DfMA (Bogue 2012).

Estratégias	Benefícios
Minimizar o número de peças	Aumenta a confiabilidade, reduz os custos de compra e inventário, montagem simplificada
Usar peças padronizadas em vez de personalizadas	Reduz custos, compra mais ágil, potencialmente maior confiabilidade,
Minimizar o uso de fixadores e padroniza-los para eficiente junção	Reduz custos, simplifica montagem, aumenta confiabilidade, simplifica reparo e manutenção
Usar o mínimo possível de materiais diferentes	Simplifica as juntas e reduz o número de processos de produção
Minimizar o uso de partes frágeis	Reduz custos devido a possíveis quebras, facilita transporte e montagem
Não especificar demais as tolerâncias ou acabamento superficial	Facilita a produção e reduz custos de fabricação
Desenhar para fabricação fácil	Reduz custos de acessórios e ferramentas

Considerar desenhos modulares	Reduz custos devido à montagem simplificada e teste
Desenhar para orientação e manuseio simples das peças	Evita realização de reparos não programados
Desenhar com a técnica de montagem já em mente	Reduz custos devido ao uso de técnicas já conhecidas e esperadas
Considerar projetar para montagem usando robós	Reduz custos em comparação com métodos manuais

Tais atitudes convergem na direção daquilo que foi anteriormente exposto: redução de custos, ganho de tempo e confiabilidade do que foi entregue. Ao passo que um dos grandes lemas da construção industrializada é a racionalização de recursos, sejam eles materiais ou económicos, qualquer prática que possa levar ao aumento da eficiência deve ser tomada a cabo.

Abd Razak et al. (2022), pesquisadores da Universiti Kebangsaan e Pusat Pengajian Citra Universiti da Malásia, também realizaram uma revisão sistemática sobre a mesma temática. A priori, Abd Razak et al. (2022, 3) trouxeram o facto de que DfMA pode ser percebido como um processo sistemático, que quando aplicado como parte da fase do *design*, poderia aplicar valor aos processos de construção e produção. No esquema abaixo (Fig. 35) pode-se perceber a aplicação constante do *design* ao longo do processo. Abd Razak et al. (2022, 4) também introduziram a ideia de que o DfMA pode servir como parâmetros avaliativos: a montagem com componentes e materiais mínimos, que consequentemente geram a mínima montagem *in situ,* é algo que pode ser avaliado sob os preceitos do DfMA.

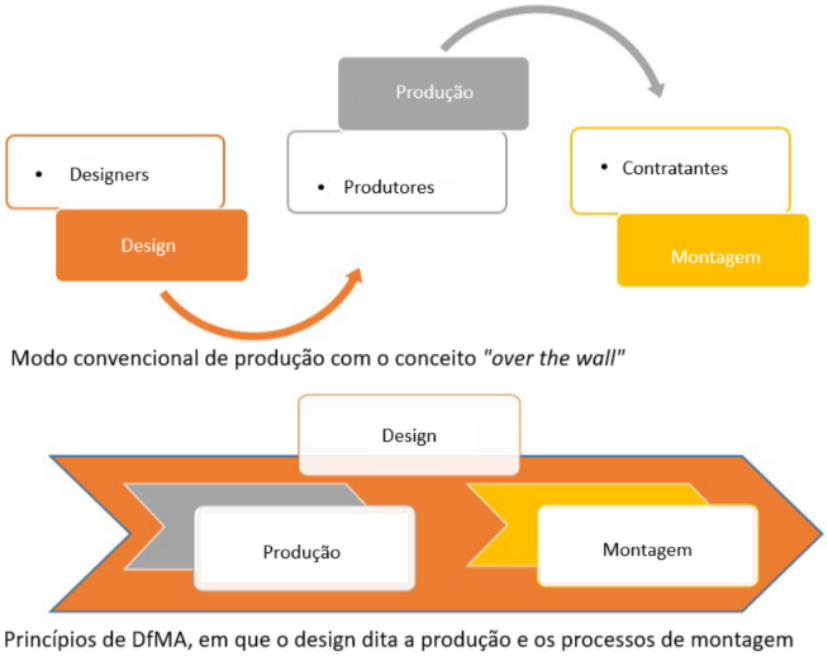


Fig. 35: Comparação entre o modelo convencional de pré-fabricação e o modelo com a aplicação dos princípios do DfMA.

(Figura de Abd Razak et al., 2022, *DfMA for a better Industrialised Building System* (buildings), 3).

Ainda segundo Abd Razak et al. (2022, 4),

> *"O principal objetivo do DfMA é ajudar os projetistas a otimizar o projeto de edifícios pré-fabricados e melhorar sua taxa de sucesso única, utilizando e integrando conhecimento profissional e informações de outras etapas dentro da fase de design"*.

Tal consideração somada ao esquema acima reforça o contraste entre o método tradicional e o método do DfMA. Ao passo que primeiro contém o *design* apenas em parte inicial e se finaliza com a passagem dos entregáveis à equipa de produção, sem se preocupar com o que ocorrerá depois, o DfMA abraça o processo de forma holística e se modela a ele quantas vezes for necessário – o que tende a gerar um produto que aproveita das potencialidades das equipas, materiais e equipamentos, além de entender seus constrangimentos, podendo assim ser considerado esse um produto **otimizado**.

- DFMA E A CONSTRUÇÃO INDUSTRIALIZADA

Há imensa expectativa no aumento da sua aplicação do DfMA ao longo dos próximos anos. Segundo Gao et al. (2020), o *Royal Institute of British Architects* (RIBA) trata o DfMA como a aproximação que facilita uma melhor produção *off-site*, minimizando a construção *in situ*. Considerações como essa, vindas de institutos de referência, tendem a influenciar incrementos de novas práticas às rotinas de projeto de empresas e escritórios.

Naquilo que diz respeito a forma de condução do processo, Smith (2010, 184) traz dois objetivos que devem constar na cabeça de todo projetista; o projetista deve pensar em executar um projeto que preveja menos operações possíveis para que assim possa ter menos potencial de falhas, melhor qualidade no produto, menor custo de produção, implementação mais rápida e maior facilidade na organização logística de montagem; o projetista deve pensar em executar um projeto mais enxuto possível, tendo assim consequentemente menos constituintes nas submontagens e menos submontagens na montagem. Smith (2010, 186) também traz uma sugestão sobre uma forma de se pensar a ordem de montagem. Segundo o autor, o processo reverso de primeiramente imaginar o produto final montado e posteriormente decompô-lo é efetivo quando se quer entender sobre a montagem. No entanto, pondera que essa técnica requer uma afinada integração de *design*, engenharia e detalhamento.

2.4.4. DESIGN PARAMÉTRICO

Dentre as muitas novas formas de se executar o *design* que surgiram após o desenvolvimento de aplicações de desenho assistidas por 'computador (CAD), o *design* paramétrico é digno de destaque. Segundo Banihashemi et al. (2018), o *design* paramétrico se notabiliza pelo uso de parâmetros na definição de uma forma, realizando correlações. Assim, permite a aplicação de informações e diferentes níveis de inteligência artificial na definição dos princípios de *design* e no fornecimento de uma estrutura, onde o *design* pode ser avaliado. Isso quer dizer que o *design* paramétrico permite a inserção de dados elementares visando a constituição de um produto geométrico final, produto esse que pode vir a ser avaliado e comparado com outros produtos gerados da mesma forma, porém com dados elementares diferentes. Ainda segundo Banihashemi et al. (2018), o procedimento generativo de *design* paramétrico constitui quatro elementos principais:

- As condições iniciais e parâmetros *(input)*;
- Um mecanismo generativo (regras, algoritmos);
- A geração de variantes *(output)*;
- A escolha da melhor variante.

Segundo os mesmos autores, o processo generativo começa com a inserção de dados para estabelecer os parâmetros iniciais. Posteriormente, esses parâmetros são transformados em um mecanismo generativo para a produção do *design*. Tal mecanismo é estruturado por códigos e contempla uma abertura para dados serem inseridos a posteriori, esses que dizem respeito às características particulares de cada variante que será gerada através do mecanismo. É notório que tanto os dados que estruturam o mecanismo, quanto os dados que serão introduzidos posteriormente, têm de ser pensados e articulados para funcionarem conjuntamente, em consonância com os objetivos do trabalho. Dessa maneira, Banihashemi et al. (2018) trazem que através desse sistema, que permite a geração de diversas hipóteses, podem-se realizar comparações.

No que se diz respeito à plataforma onde se pode realizar a codificação desse mecanismo, é interessante destacar que a mesma pode ser um sistema baseado em gráficos *(graph-based system)*, segundo Banihashemi et al. (2018). Essa classe de sistemas (*software)*, que tem como exemplares mais reconhecidos o *Dynamo* e *Grasshopper*, permite explorar projetos e representar formas com liberdade, além de lidar com restrições e adequá-las entre componentes diferentes, ainda segundo Banihashemi et al. (2018). O *software Grasshopper*, especificamente, ganhou certa notoriedade na integração de fluxos de trabalho generativos devido a sua usabilidade e baixo consumo de recursos computacionais. No entanto, cabe a ressalva de que essa classe de *softwares* apresenta suas limitações naquilo que se refere à presença de informações em seus elementos – o que exige um *software* complementar.

- FORMAS DE EXECUÇÃO

Há de se destacar que diversas empresas já incluíram em seu *workflow* a incorporação dos *softwares* baseados em gráficos e também *softwares* BIM (*Building Information Modeling*, ou modelação da informação da construção), sendo que esses últimos trazem consigo como vantagem o facto de que além permitirem o *design* paramétrico, também permitem a atribuição de informações aos seus elementos. Dessa maneira, *softwares* BIM abriram a possibilidade de um cenário onde elementos específicos podem ser criados e relacionados a informações potencialmente alteráveis (sejam materiais, localizações, dimensões, etc.). Posteriormente, segundo Banihashemi et al. (2018), esses elementos podem ser remodelados ou mesmo conectados a outros:

> *"(...) As capacidades paramétricas podem então redefinir a maneira pela qual as ideias de design são geradas, vinculando a criatividade fornecida pelo Grasshopper com objetos digitais inteligentes enriquecidos em bancos de dados. "*

Em um segundo cenário, esse já envolvendo uma integração entre um *software* BIM e um sistema baseado em gráficos, elementos podem ser criados no primeiro *software* e levados ao segundo, esse que dotado de um mecanismo exclusivo, permite a alteração paramétrica desses elementos ou, por exemplo, podem fazer parte de uma simulação de quantos elementos são necessários para preencher uma determinada superfície e qual a metragem dos espaços residuais não preenchidos. De certa forma, percebe-se que essa abordagem permite que o *design* paramétrico tenha maiores ganhos ao integrar duas plataformas com características distintas, porém relacionáveis. Essa integração abriu possibilidades interessantes: se tornou possível realizar estudos e simulações específicas de uma forma mais ágil do que era realizada antes e os processos se tornaram menos propensos a falhas devido à conexão direta entre *softwares*.

Para além dos *softwares* e ferramentas, há também de se pontuar sobre os atributos computacionais e de inteligência artificial que guiam a criação dos mecanismos generativos, segundo Banihashemi et al. (2018): *"(...) esses incluem regras, restrições, dependências paramétricas, estruturas heurísticas e meta-heurísticas para codificá-los".* Já segundo El-Zanfaly (2009), no que diz respeito à heurística, o *design* paramétrico mais precisamente se relaciona com seu modelo de pesquisa estocástica, esse que

orienta em "construir um conjunto de possíveis soluções para posteriormente analisá-las até alguma condição ser estabelecida de acordo com as regras estabelecidas".

> *"(...) Através da interface, o projetista pode inserir parâmetros e regras, e posteriormente o sistema (MHAS) irá produzir alternativas 3D de acordo com as condições especificadas e gerar uma vista selecionada. Desse sistema generativo se espera facilitar o processo de design, gerar soluções inesperadas para especificadas regras e ganhar tempo na fase inicial de design."* (El-Zanfaly 2009).

Como agora se entende que o *design* generativo diz respeito sobre **cenários**, **simulações**, **probabilidades**, **resultados**, **comparações** e **escolhas**, é essencial que seu processo seja contemplado por algum dos cenários abaixo:

Tab. 06: Funcionamento do mecanismo e tratamento do usuário.

Mecanismo	Tratamento pelo usuário
01. Recebe as informações em *inputs* e gera o *output* de dois ou mais modelos finais.	01. Analisa e define o modelo mais condizente aos seus interesses.
02. Recebe as informações em *inputs* e gera o *output* de apenas um modelo final.	02. Apresenta as informações desse modelo para o usuário.

O primeiro mecanismo e tratamento têm maior aplicabilidade em um caso onde o *design* final deva ser submetido posteriormente a alguma análise subjetiva, como o gosto do projetista ou cliente, ou quando deva ser submetido à uma análise posterior que envolva fatores de complexa parametrização, como, por exemplo, aspectos ambientais. O segundo mecanismo e tratamento contempla um cenário objetivo, onde a própria máquina recebe de *input* tudo o que é necessário e assim faz seus cálculos de forma concatenada com um processo de filtragem, sempre com o objetivo de apresentar um único resultado, porém exato. Dessa forma, é necessário se debruçar nas premissas do projeto e nos desejos do usuário final para que seja a exploração projectual via *design* generativo seja conduzida e guiada pela maneira mais coerente.

- DESIGN PARAMÉTRICO, DFMA E CONSTRUÇÃO INDUSTRIALIZADA

Hong et al. (2023) trouxeram a informação de que *"(...) o DfMA é avaliado como uma tecnologia que pode maximizar as vantagens da modularização na construção pré-fabricada"*. Pode se dizer que o *design* paramétrico pode maximizar as vantagens do próprio DfMA, gerando uma cascata de efeitos positivos na construção industrializada. Em casos onde existem diversos fabricantes com distintos valores, materiais e padrões de qualidade para o mesmo elemento construtivo, o *design* paramétrico pode entregar opções óptimas devido sua relação com a combinatória, ramo da matemática que estuda as relações entre coleções de elementos, além da sua possibilidade de filtragens.

Cientes disso, Hong et al. (2023) realizaram um estudo em busca de um modelo de habitação de custo ideal. Inseriram em um mecanismo generativo objetos BIM de portas, janelas, paredes, POD's de cozinha e POD's de sanitários (Fig. 36).

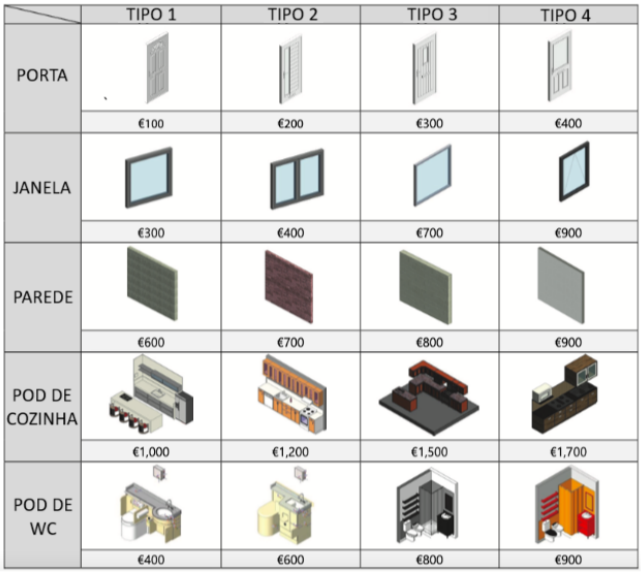


Fig. 36: Elementos BIM para a exploração de diferentes módulos.

(Figura de Hong et al., 2023, *Development of Building Component Combination Algorithms for Generative Design-based DfMA Applications (Digital Design Reconsidered - eCAADe)*, 212).

Como cada um dos cinco grupos possuía quatro objetos, Hong et al. (2023) obtiveram 1024 combinações (resultado de 4^5), essas que puderam ser posteriormente filtradas por valores, visto que cada um desses elementos possuía um preço referenciado ao objeto BIM (Fig. 37).

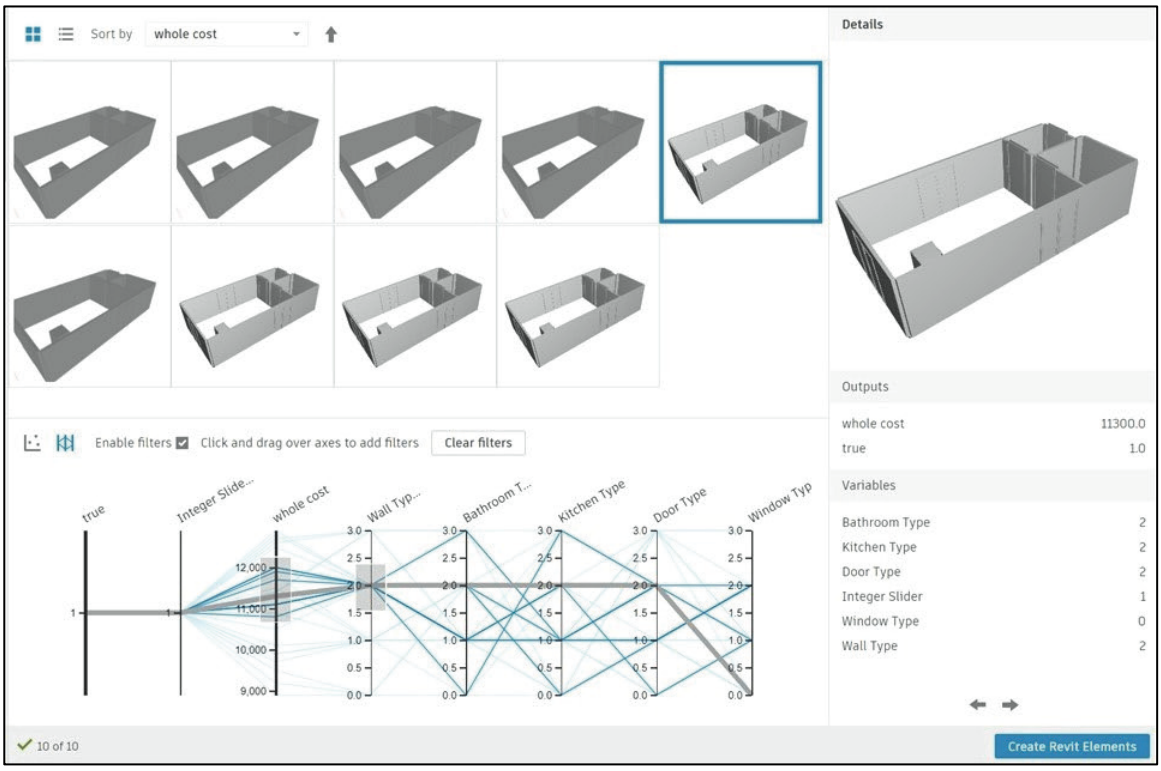


Fig. 37: Tela da simulação de Soon Min Hong *Et al*. mostrando opções geradas (acima), a teia de combinações (abaixo) e o modelo ideal obtido do processo (direita).

(Figura de Hong et al., 2023, *Development of Building Component Combination Algorithms for Generative Design-based DfMA Applications (Digital Design Reconsidered - eCAADe)*, 215).

Ademais, a exploração generativa pode conciliar com os preceitos de economia e otimização do DfMA através de outros vieses. Pode mostrar dados comparativos e guiar a redução de custos de obra, redução de prazos e também a redução de descarte de resíduos, tema que foi o cerne do trabalho de Banihashemi et al. (2018), que conseguiram comprovar através de simulações e análises quantitativas geradas através do *design* paramétrico a possibilidade de se gerar menos resíduos na aplicação de painéis de pladur em paredes e tetos (no melhor dos casos encontraram o valor de desperdício de 0,0205 vezes a metragem dos painéis e no pior dos casos o valor de 0,8392 vezes a metragem dos painéis). Em suma, naquilo que tange a combinação de fatores espaciais absolutos (dimensões), fatores quantitativos (valor monetário, composição físico-química, etc.) e objetivos (material, marca), o *design* generativo traz a possibilidade devido às operações matemáticas em seu cerne, promovendo relações, exclusões, confluências e filtragens. Como apontado anteriormente, mostra-se de grande valia para o processo inicial de desenho.

2.5. SÍNTESE DAS TEMÁTICAS

2.5.1 HABITAÇÃO EVOLUTIVA

Exemplos trazidos no Estado da Arte sobre a arquitetura modernista, sobretudo aqueles que se relacionam com a construção pré-fabricada, tenderão a influenciar o Caso de Estudo. A lista abaixo, de exemplos trazidos por Rangel, Bárbara (2013, 71–83) contém os modelos específicos de referência e seus destaques de maior pertinência para este trabalho:

- **"Casa que Cresce *("Das Wachsende Haus"),* de Walter Gropius:** sistema de paredes desmontáveis que permitem compor diversas volumetrias;
- ***"Small Metal House",* de Marcel Breuer:** possibilidade de trocas de painéis de paredes, janelas e portas;
- **"Casa Pátio", de Mies Van der Rohe**: liberdade para flexibilização interna através da desconexão de estrutura e paredes;
- **"Casa Dominó", de Le Corbusier:** separação da estrutura da forma, enfoque na produção industrial e embasamento para a criação da metodologia de **Projeto Integrado**;
- ***"Maison Locheur",* de Le Corbusier:** móveis conversíveis que permitem promover flexibilizações momentâneas.

Dentre os estudos de caso projetados e edificados em período posterior ao modernismo (década de 60 em diante), destacam-se os seguintes que também trazidos por Rangel, Bárbara (2013, 83–88):

- **"Casas Expansíveis", de Van Broek e Bakema:** casas modulares evolutivas que podem ser compostas em banda (geminadas), podendo ter um ou dois andares;
- ***"E.C.C.S. Steel Housing, Square L-TYPE":*** unidades habitacionais que permitem flexibilização interna e podem aumentar de tamanho ao serem associadas a outras unidades habitacionais ou módulos;
- ***"Habitat 67",* de Moshe Safdie:** possibilidade de agregar habitações umas sobre as outras, fazendo com que o teto da residência abaixo possa se tornar piso e terraço da residência acima;
- ***"ZIP House",* de Richard Rogers, Norman Foster, Su Brumwell e Wendy Cheeseman:** uso de peças de andaimes na base para instalação em terrenos de declividades distintas, disposição de infraestruturas sob o piso e ampla possibilidade de flexibilizações internas.

Todas as estratégias citadas, voltadas notoriamente à evolução residencial, possuem grande potencial para serem livremente adaptadas e aproveitadas no Caso de Estudo, sejam essas convertidas em regras de composição ou objetos construtivos.

No que se refere à habitação e a conexão com o usuário, calha de que os conceitos formulados por Habraken referentes ao "suporte" e ao "conteúdo" de uma edificação têm bastante pertinência. O entendimento do interior como um elemento separada e conectada ao usuário o empodera na tomada de decisões de sua habitação. Entende-se também que é interessante a adoção de uma tecnologia de flexibilização que seja "rígida" (Schneider e Till 2007, 7), visto que se enquadra melhor ao contexto do trabalho e seus objetivos, que é gerar diferentes perfis de habitações unifamiliares através da composição de componentes e módulos predefinidos.

Por fim, cabe também destacar a percepção de que a edificação inevitavelmente passa por alterações em sua vida, e que essas alterações podem ser derivadas de questões relacionadas à manutenção, mudanças de uso e mudanças sociais. A ciência desses factos deve ser tida pela equipa de projeto, principalmente quando se almeja produzir projetos impactantes que gerem o um alto sentimento de pertencimento nos usuários.

2.5.2 Construção Modular e Pré-fabricada

As informações referentes aos fundamentos da construção industrializada, que foram esmiuçadas por Smith (2010, 99–126) e estão expostas nesta tese, trazem aspetos técnicos de grande valia, nomeadamente informações sobre sistemas construtivos industrializados, os materiais mais utilizados, os métodos de fabrico de componentes/módulos, as características dos componentes/módulos (grau de personalização e grau de trabalhos industriais envolvidos) e os tipos de grelhas modulares.

Há de se destacar que as informações sobre os sistemas construtivos são bastante pertinentes, pois abarca a construção de forma holística, apresentando conteúdos sobre a estrutura, envoltória, serviços, espaço e sítio. Dessa maneira, o trabalho de Smith dá um sinal verde para a exploração e cruzamento no Caso de Estudo das temáticas expostas no Estado da Arte, visto que para além de trazer a tecnicidade, mostra que a modularização que a industrialização traz coaduna com os preceitos da construção evolutiva. Há também de se pontuar que a interpretação do edifício de Smith (2010, 182–83), que o coloca como um agregado de constituintes que formam submontagens para posteriormente formar um módulo. Ao se estabelecer uma hierarquia, a lógica projetiva fica mais fluida e permite um melhor entendimento do que pode ser substituível em um contexto de habitação flexível – e pelo quê. Dessa forma, facilita readequações espaciais e encorpa ainda mais a presença da arquitetura evolutiva neste trabalho.

Foram também discutidas as principais problemáticas da construção industrializada na atualidade, nomeadamente questões relativas à ocorrência de constrangimentos semelhantes aos da construção tradicional, isso devido ao desencontro de ideias entre intervenientes e a baixa exploração de todo o potencial da construção *off-site*. É necessário elaborar o produto do Caso de Estudo com estas informações em mente, de forma que o trabalho final sempre busque responder às problemáticas e apontar as melhores práticas.

2.5.3 DfMA

Foi mostrado que a aplicação do DfMA deve ganhar mais ênfase na construção civil ao longo dos próximos anos (Gao et al. 2020). Em um contexto onde a sociedade clama por um uso mais controlado de recursos naturais e energia, o DfMA naturalmente ganhará mais espaço devido sua constante busca por mais eficiência no processo produtivo. No que tange os intervenientes, a questão do custo e do tempo reduzidos surgem como fatores de destaque.

Ademais, o processo de *design* de Boothroyd (2005), que sempre revisita etapas em busca de se obter o produto mais alinhado possível aos preceitos de economia de recursos e tempo do DfMA, e a tabela de

estratégias para a etapa de produção de Bogue (2012), apontam diretrizes essenciais para serem levadas em conta durante o desenvolvimento do Caso de Estudo.

2.5.4 Design Paramétrico

Foi demonstrado nos trabalhos de Banihashemi et al. (2018) e Hong et al. (2023) que o *design* paramétrico tem grande conexão com a indústria da construção civil, exatamente ao possibilitar a criação de distintos cenários durante o processo projetivo, permitindo assim a comparação de diferentes informações e a escolha da opção que seja mais conveniente ao interesse dos intervenientes. Ademais, foram apontados *softwares* comumente utilizados, as formas de se executar o *design* paramétrico e as lógicas envolvidas, apontando assim possíveis fluxos de trabalho que podem ser tomados.

Dessa forma, fica patente que o *design* generativo apresenta correlação com as premissas deste trabalho, mostrando solidez para sustentar o produto que se espera do Caso de Estudo.

2.6. Pesquisa de Mercado

Neste subcapítulo serão apresentados os modelos de construções análogos aos temas apresentados no Estado da Arte, apresentando assim potencial de agregar ideias para o desenvolvimento e os produtos expectáveis do Caso de Estudo.

- Modelo 1 – *U-Build* – Componentes

Idealizado pelo Studio Bark, o *"U-Build"* é um sistema de blocos pré-fabricados para edificações (Archdaily, 2021). Se destaca devido ao facto de ter sido pensado desde o princípio para ser montado por pessoas sem conhecimento técnico avançado e com ferramentas simples. Remover os constrangimentos para democratizar a construção, portanto, é um dos objetivos principais desse sistema.

> *"We think that inclusion and empowerment are the best ways of improving our societies. How can we build back better, when we don't know how to build?" – Nick Newman (Studio Bark)* (Archidaily, 2021)

Como se nota nas representações (Fig. 38, 39 e 40), o *"U-Build"* é conformado por grandes blocos. Segundo os autores do projeto, eles chegam à obra em pacotes dimensionados para a escala humana para facilitar o processo da montagem. *In situ*, são unidos para formar paredes, tetos e pavimentos. A forma dos mesmos foi definida para ser retangular, visto que essa forma torna a montagem mais intuitiva e também permite tirar o máximo da eficiência dos materiais. Outro ponto de destaque é a possibilidade de reutilização dos blocos.

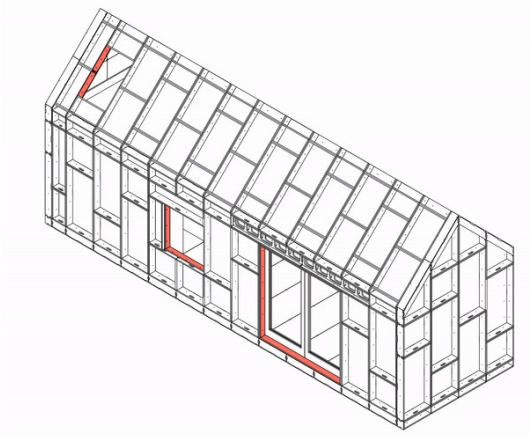
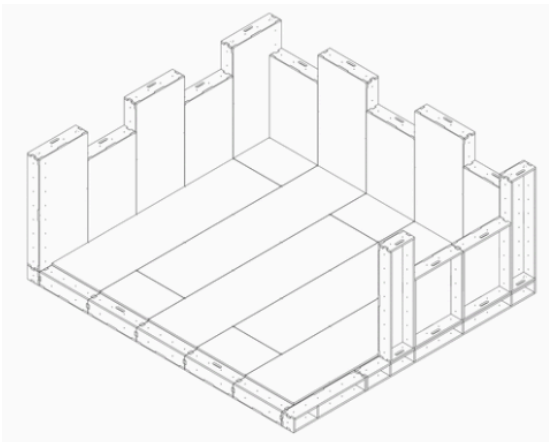


Fig. 38: Representação de edifício feito com *U-Build*.

(Figura de Archdaily, 2021, https://www.archdaily.com/958331/building-houses-with-giant-blocks-u-build-and-the-future-of-self-construction?ad_campaign=normal-tag. Acedido a 19 de janeiro de 2024).



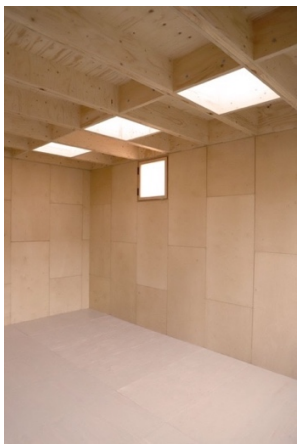


Fig. 39 e 40: Processo de montagem com *U-Build*; Interior de edificação feita com o sistema *U-Build*.

(Figura de Archdaily, 2021, https://www.archdaily.com/958331/building-houses-with-giant-blocks-u-build-and-the-future-of-self-construction?ad_campaign=normal-tag. Acedido a 19 de janeiro de 2024).

Esse modelo se relaciona com esta tese devido ao facto de que articula as disciplinas da construção modular e pré-fabricada, habitação evolutiva e também *design* generativo, visto que os blocos são feitos a partir de objetos paramétricos. De acordo com a demanda do projeto, são modelados para posteriormente serem cortados em uma oficina local (próxima da obra) e posteriormente transportados. Para além desses atributos, o *U-Build* também permite a atuação do usuário na reconfiguração espacial, o que torna o ato de construir mais democrático, menos custoso e com maior geração de sentimento de pertencimento ao usuário. Por conta disso, o *U-Build* pode ser tido como uma possível referência para o desenvolvimento dos componentes do Caso de Estudo.

- MODELO 2 – UNA BV – FORMA DE ARRANJO

Criado pelo escritório brasileiro UNA BV, o sistema "*Modular 5.5"* é um exemplo interessante da união de sustentabilidade, eficiência produtiva e ordenação da planta (Archdaily 2023). Utilizando madeira de reflorestamento (eucalipto), o sistema possui uma decomposição de elementos bastante clara, fazendo com que certos componentes possam ser reusados em módulos distintos (Fig. 41). Isso faz com que o processo de produção e montagem seja mais célere e económico.

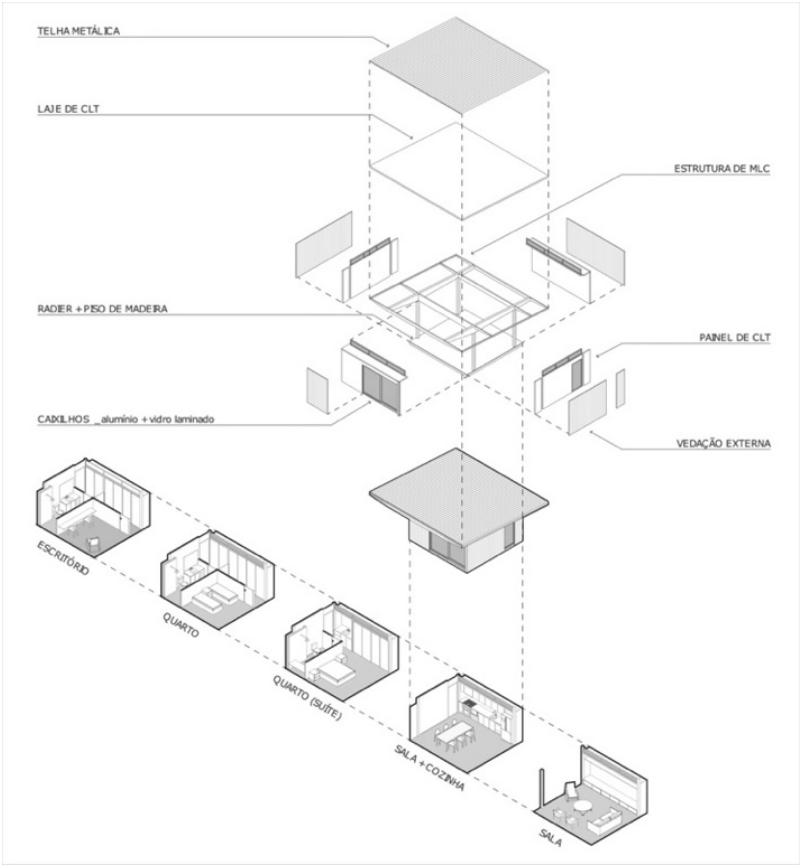


Fig. 41: Decomposição do módulo e exemplificação de como uma estrutura pode servir para diferentes compartimentos.

(Figura de Archdaily, 2023, https://www.archdaily.com/998454/a-modular-project-like-an-assembly-game-mass-timber-prefabricated-houses?ad_campaign=normal-tag. Acedido a 19 de janeiro de 2024).

No que tange a forma de arranjo, especificamente, o Modular 5.5 foi criado não para ser um projeto fechado, mas um sistema. Isso se justifica pelo motivo de os autores terem desenhado uma série de compartimentos, esses que podem ser arranjados de distintas formas (Fig. 42 e 43).



Fig. 42 e 43: Possíveis módulos da UNA BV; Possíveis formas de composição com módulos da UNA BV.

(Figura de Archdaily, 2023, https://www.archdaily.com/998454/a-modular-project-like-an-assembly-game-mass-timber-prefabricated-houses?ad_campaign=normal-tag. Acedido a 19 de janeiro de 2024).

É interessante notar que esses dez modelos de evolução só podem acontecer devido ao facto de os projetistas terem racionalizado sobre a maneira da circulação nos ambientes coletivos e privativos. Dessa maneira, denota-se que em todas os módulos há um espaço transversal destinado a circulação, exatamente situado na fachada inferior dos esquemas apresentados acima. A maioria deles pode ser disposta de forma livre, sendo condicionados somente pelos módulos de extremidade (quarto-suíte e lavandaria, que não foram pensados para fazer parte do jogo de circulação coletiva). Dessa forma, o modelo de módulo e a lógica evolutiva mostram-se convenientes para utilização no Caso de Estudo.

- MODELO 3 – *BENSONWOOD HOMES* – SEPARAÇÃO DE FACHADA E INTERIOR

Smith (2010, 288–90) traz em seu livro um caso de estudo da empresa *Bensonwood Homes*, especialista em casas de madeira que atua há mais de 50 anos na América do Norte. Um dos princípios envolvidos em seus projetos chama a atenção: o facto de buscarem uma clara separação entre invólucro e preenchimento. Ao passo que o invólucro dita o conforto ambiental e a longevidade da construção, é essencial que receba uma atenção superior à atenção dada aos elementos de preenchimento da edificação. Com essa visão, Tedd Benson, presidente da empresa, estabeleceu que o investimento mais custoso da construção deve ser o involucro, o colocando acima de materiais de acabamento interno ou eletrónicos voltados a entretenimento. Assim, a *Bensonwood* se notabilizou pela boa qualidade, e atualmente evolui seu sistema de invólucro para durar mais de 100 anos. Cabe destacar que esse trabalho somente dá certo graças a um time multidisciplinar alinhado, o que segundo o autor faz com que a *Bensonwood* também seja reconhecida pela boa implementação do projeto integrado.



Fig. 44: Galpão de produção da *Bensonwood Homes*.

(Figura de Ryan E. Smith, 2010, *Prefab Architecture – A guide to modular construction and design* (John Wiley & Sons), 289).

É interessante esmiuçar sobre essa separação conceitual sob a ótica do presidente da empresa (Tab. 07). Ele estabelece que enquanto o invólucro tem impacto no controle público e regulação urbana, o preenchimento tem impacto na liberdade do indivíduo. Também, que enquanto a intenção do invólucro é ter durabilidade e alinhamento com a sustentabilidade, o preenchimento tem que possibilitar mudanças fáceis. Por fim, enquanto os intervenientes responsáveis pelo invólucro têm de ser arquitetos, engenheiros e os órgãos de regulação, os intervenientes responsáveis têm de ser os habitantes e profissionais de interiores.

Tab. 07: Tabela elaborada por Tedd Benson (Smith 2010, 290).

	Envoltória	Interior
Impacto	Controle público, regulação	Liberdade individual
Intenção	Longa durabilidade, sustentabilidade	Mudança fácil e modificação

Intervenientes	Arquitetos, engenheiros, agências	Habitantes, profissionais de interiores

Por fim, é interessante pontuar que a *Bensonwood* não apenas separa conceitualmente invólucro e preenchimento, mas também busca efetuar separações físicas em outras escalas. Em linhas gerais, a *Bensonwood* ao longo dos anos elaborou uma sistematização bem definida, que envolve sistemas de estrutura, sistemas de piso, sistema mecânico e sistemas de painel de suporte.

Tal estratégia é tomada a sério em cada projeto, onde dentro de cada sistema, os componentes, módulos e painéis são desagregados, podendo-se imaginar que dentro de um organograma geral de suas edificações, a maioria de seus elementos é intercambiável. Assim, além dessa estratégia otimizar a sequência de montagem, facilita as adaptações futuras, permite avaliar o ciclo de vida de cada componente e facilita a desmontagem da construção.



Fig. 45: Habitação da *Bensonwood Homes*.

(Figura de Ryan E. Smith, 2010, *Prefab Architecture – A guide to modular construction and design* (John Wiley & Sons), 293).

Tais atributos vão de encontro com as expectativas do projeto. A ideia de interpretação dos componentes como elementos separados, além dos propósitos ambientais, também se enquadra nos propósitos de evolução. Por fim, a hierarquização dos elementos também deve ser levada a sério, visto que os módulos, componentes e painéis de uma construção não podem ser vistos de uma forma "horizontal", isto é, certos elementos ditam mais o sucesso de uma edificação do que outros.

- MODELO 4 – *NJORDRUM* – EVOLUÇÃO DE ACORDO COM VOLUMES ADICIONAIS

No que toca a modulação e junção de novos módulos (compartimentos), o modelo conceitual elaborado pelo escritório *Njordrum* (Archdaily, 2019) chama atenção devido a sua facilidade de evolução e fluidez: o sistema começa com um núcleo base de 45m^2 e evolui com módulos de semelhante volumetria (Fig. 46 e 47). Ao passo que a porção central se destina à circulação, a estratégia funciona, visto que a união de diferentes blocos tende a criar um corredor central.



Fig. 46: Estudo de evoluções do modelo da *Njordrum* com 1 e 2 módulos.

(Figura de Archdaily, 2019, https://www.archdaily.com/923534/modular-housing-concepts-by-danish-architects. Acedido a 19 de janeiro de 2024).

Pode se dizer em linha gerais que nesse modo de evolução a modulação se dá em função do núcleo base e suas dimensões. Isso remete à evolução da casa pátio japonesa (Fig. 08) que, segundo Rangel, Bárbara (2013, 52), tem um núcleo-base que se inicia com 2 esteiras conectadas que formam um quadrado (1 *Ken* x 1 *Ken*) e evolui ao agregar outras esteiras de tamanhos exatos, fazendo com que o bloco sempre apresente dimensões finais de acordo com uma métrica padrão (sempre terá dimensões com um número exato de *Kens* ou um número de *Kens* + 1/2 *Ken*). Ao promover uma repetição sistemática de elementos estruturais e de certa forma também forçar a repetição de elementos de fachada, esse modo de evolução se alinha com o preceito de diminuição de peças do DfMA trazido por Bogue (2012, 112–18), mostrando-se assim bastante conveniente para uma fabricação mais económica e célere. É importante destacar que por mais que esse modelo possa se mostrar a princípio enrijecido devido à expansão sempre seguir a volumetria do módulo base, tal premissa não se sustenta por muito: há a possibilidade de geração de várias combinações finais devido às diversas possibilidade de organização dos anexos, disposição de painéis e configuração de planta (localização dos compartimentos).



Fig. 47: Representação do modelo da *Njordrum*.

(Figura de Archdaily, 2019, https://www.archdaily.com/923534/modular-housing-concepts-by-danish-architects. Acedido a 19 de janeiro de 2024).

Dessa maneira, ao seguir uma lógica matemática de evolução baseada em retângulos conciliada a uma sistematização dos componentes construtivos, esse tipo de evolução torna-se influência para o desenvolvimento do Caso de Estudo no que diz respeito ao modo de como os acréscimos (novos compartimentos) podem ser anexados ao módulo-base.

3

CASO DE ESTUDO

3.1. INTRODUÇÃO

A priori, em um primeiro momento o desenvolvimento do Estado da Arte voltou-se à pesquisa de maneiras mais eficientes de se gerar um projeto construtivo, produzir componentes e realizar montagens, sempre conciliando temas contemporâneos da indústria da construção civil. A intenção foi que a pesquisa inicial indicasse um caminho para a elaboração de uma ferramenta e a que pudesse servir para a criação otimizada de projetos construtivos industrializados. Desse modo, intencionou-se que o Caso de Estudo fosse um processo que inicialmente absorveria as informações anteriores, fazendo uma filtragem daquilo que mais coaduna com as problemáticas abordadas no Estado da Arte. Seu fim seria a geração dos produtos com potencial de gerar economia de tempo em gabinetes de projetos e, para além, que também fossem capazes de gerar economia de tempo e recursos ao serem modelados de acordo com as potencialidades e limites encontrados no resto da cadeia, nomeadamente o processo de produção, o processo de transporte e o processo de montagem dos módulos *in situ*. Ademais, a ferramenta expectável do Caso de Estudo vai de encontro às correntes contemporâneas de projeto e produção, onde a informatização e industrialização são parte do léxico dos executores.

Desse modo, neste capítulo estão apresentados os processos que guiaram a criação dessa ferramenta, nomeada **Modelo Paramétrico**. Primeiramente está apresentada a elaboração de uma Lista de Regras de Composição, que ditou as regras construtivas dos projetos criados no Modelo. Posteriormente, está exposto o processo da modelação dos componentes para serem inseridos no Modelo. Em seguida, está apresentado o desenvolvimento do Modelo dentro de um *software* com capacidades paramétricas. Ademais, também estão expostas neste capítulo as potencialidades e lacunas para aprimoramentos futuros, tendo como base seu funcionamento e os projetos construtivos que foram gerados. Todo o desenvolvimento desse Modelo é, acima de tudo, uma **Metodologia** de projeto.

3.2 PERTINÊNCIA DO ESTUDO E ENQUADRAMENTO

Como está supracitado, o Caso de Estudo, além de dizer respeito à criação de um produto final, também procura melhorar a eficiência na relação dos processos de projeto, produção, transporte e montagem de habitações. De forma geral, as boas práticas discutidas no Estado da Arte, nomeadamente as que dizem

respeito ao uso mais consciente dos materiais, redução de tempo nas etapas de projeto e uso controlado dos meios de transporte de cargas, tendem a ter grande pertinência para a sociedade ao promover:

- Redução de extração de materiais na natureza;
- Redução de custos para o empreiteiro e o público final;
- Redução do descarte de resíduos durante a montagem e pós-vida;
- Produção mais célere de edificações.

Desse modo, o cerne do trabalho é a entrega para a sociedade de um conteúdo que leve em conta a **sustentabilidade**, visando a redução das ações antrópicas na natureza pelo sector da construção industrializada, e a **democratização da habitação**, visando um modelo de habitação com custos reduzidos e que consequentemente possa ser mais acessível. Diante das alterações climáticas e sociais que são observadas ao longo das últimas décadas, é louvável qualquer iniciativa que busque a melhor integração do homem ao ambiente construído e o mínimo impacto do homem no meio natural.

Há de se destacar que os conteúdos do Caso de Estudo são voltados para serem apropriados por equipas projetistas de edificações, essas que usualmente utilizam em suas rotinas *softwares* CAD instalados em microcomputadores. Em determinados casos, essas equipas também podem utilizar da metodologia BIM, o que tende a agregar maior qualidade ao processo.

3.3 OBJETIVOS E RESULTADOS A ALCANÇAR

Foi disposto como **objetivo geral** o desenvolvimento do Modelo Paramétrico com três funcionalidades básicas, sendo essas uma funcionalidade que permite a geração automática de projetos construtivos, uma funcionalidade que possibilita se fazer alterações posteriores nos projetos gerados automaticamente (como a troca de um painel por outro por exemplo) e a funcionalidade de se obter o quantitativo dos componentes que fazem parte do projeto. Para o Modelo Paramétrico ganhar forma, portanto, foi necessária a determinação de três atividades específicas:

1: Criação de uma Lista de Regras de Composição, essa derivada dos estudos realizados no Estado da Arte. Essa Lista de Regras deveria embasar não apenas a modelação dos componentes e suas conexões dos pontos de vista estéticos e funcionais, mas deveria em conta todo o contexto que envolve o processo de produção e edificação de uma habitação realizada com elementos pré-fabricados.

2: Modelação dos elementos principais de uma edificação, nomeadamente os estruturais, de vedação, infraestruturais e de cobertura. Esses entrariam no Modelo Paramétrico para compor as possibilidades de projetos criados pelo mecanismo.

3: Elaboração de códigos dentro do Modelo Paramétrico que permitam a geração automática de projetos de edificações e que permita exportar o quantitativo de componentes de cada projeto, visando a posterior análise pelos projetistas e comparação com outros contextos.

Ademais, há também um **objetivo secundário**, esse que surgiu de forma espontânea ao decorrer do desenvolvimento do Caso de Estudo:

1: Apontamento de uma estrutura metodológica relacionando o processo de criação do Modelo Paramétrico até os projetos que são gerados pelo mesmo, de forma que pudesse influenciar investigações futuras dentro das temáticas de construção industrializada e *design* generativo.

Diante disso, esperou-se como resultado intermédio a elaboração da Lista de Regras de Composição, a definição dos componentes e a modelação dos mesmos. Como resultado final, esperou-se a realização do Modelo Paramétrico com suas funcionalidades elementares.

3.4. METODOLOGIA

A fim de cumprir os objetivos supracitados, o desenvolvimento deste trabalho necessitou ser dividido em quatro distintas etapas, sendo a primeira com viés conceitual e as restantes com viés executivo:

I. Elaboração da Lista de Regras de Composição;

II. Modelação virtual dos elementos construtivos;

III. Coordenação dos modelos virtuais dos elementos construtivos em um Modelo Paramétrico, esse inserido dentro de um *software* que permita a exploração generativa;

IV. Criação de funcionalidades que permitam a geração automatizada de habitações, a edição posterior dessas habitações e também a exibição da quantidade de elementos presentes em cada geração de habitação.

A etapa I diz respeito às dimensões de elementos, como se encaixam, como é a unidade modular do projeto, quais os materiais utilizados, como são os módulos e como se relacionam. Tratou-se da compilação de conteúdos investigados e a análise se servem ou não ao contexto do trabalho.

A etapa II diz respeito à transposição das informações físicas dos elementos para o computador, popularmente conhecida por modelação virtual em três dimensões (3D).

A etapa III diz respeito a coordenar adequadamente os elementos modelados virtualmente a um *software* paramétrico com funcionalidade de agregar os elementos para formar módulos. Importante de se frisar que o *software* de *design* paramétrico deve ter funcionalidade de copiar elementos, movimentar e rotacionar, para que assim haja liberdade para juntar elementos aos outros. Outra funcionalidade essencial é a abertura para definir condicionantes, visto que combinações específicas de elementos devem acontecer apenas em função de parâmetros introduzidos pelo usuário.

A etapa IV diz respeito às múltiplas formas que os elementos, nomeadamente os painéis de vedação, podem ser combinados para formar um módulo único. Ademais, distintos módulos podem ser combinados para formar uma habitação, o que quer dizer que dois fatores personalizáveis (tipo de painel e posição do módulo) podem levar à criação de uma infinidade de layouts dentro de apenas uma tipologia. Isso permite ao projetista analisar as possibilidades de layouts sob um crivo quantitativo, buscando apontar quais soluções precisam de menos componentes e são mais económicas.

Com essas etapas compreendidas, estipulou-se como ideal a modelação dos componentes construtivos no *software Revit*, esse que possui uma interface dedicada para a modelação de componentes construtivos (estabelecidos no *software* como "famílias"). O *software Revit* foi coordenado ao *software Rhinoceros* através de um *plugin* denominado *Rhino inside Revit*, criado pelos próprios desenvolvedores do *Rhinoceros*. Ao passo que o *software Rhinoceros* contém um *plugin* nativo voltado ao *design* paramétrico denominado *Grasshopper*, todo esse arranjo de *softwares* tem o potencial de levar elementos modelados virtualmente no *Revit* para uma plataforma com capacidades de organizações de elementos através da linguagem de programação visual.

3.5. PLANO EXPERIMENTAL

Diante de tudo que foi exposto, foi necessário delinear um plano experimental que as ações fossem vinculadas ao cronograma disponível. A priori, o plano de ação desenhou-se em torno das quatro etapas supracitadas e fragmentou-se de acordo com as tarefas necessárias para cumprir cada uma das etapas. Dessa maneira, pode ser estabelecido o seguinte passo a passo:

- ETAPA I

  Tarefa 1 - Reunião das informações do Estado da Arte para a elaboração da Lista de Regras de Composição: essa tarefa compreendeu a análise e sintetização do conteúdo exposto no capítulo do Estado da Arte. Foram analisadas as informações trazidas pelos autores dentro dos quatro grandes temas, e, diante disso foi feito uma interpretação do que seria mais relacionável possível à problemática que influenciou o desenvolvimento deste trabalho.

  Tarefa 2 - Elaboração da Lista de Regras de Composição: a elaboração gerou uma lista que trazem informações sobre unidade modular, dimensões de módulos, dimensões de componentes, sistema construtivo, e hierarquia de componentes, tudo embasado pela ideia de se gerar um projeto construtivo otimizado.

- ETAPA II

  Tarefa 1 - Modelação virtual dos elementos construtivos: foram modelados virtualmente elementos correntes de uma construção industrializada: estrutura, laje de piso, laje de cobertura, painéis de vedação opacos, painéis de vedação com aberturas (portas e janelas), telhado.

- ETAPA III

  Tarefa 1 - Entendimento das funcionalidades do *software* de *design* paramétrico: estudo das funções, ferramentas e do *layout* do *software*, de forma que o produto pretendido possa ser executado.

  Tarefa 2 - Importação dos elementos para o *software* de *design* paramétrico: definição de um código dentro do *software* de *design* paramétrico que faça com que os elementos modelados virtualmente possam ser introduzidos neste *software* e que os elementos posteriormente possam compor um módulo.

  Tarefa 3 – Realização de experimentações aplicadas e baseadas nas funcionalidades previstas para o Modelo Paramétrico.

- ETAPA IV

  Tarefa 1 - Produção de Modelo Paramétrico a partir dos elementos importados: criação de Modelo Paramétrico que coordene os elementos modelados virtualmente de acordo com o que está expresso na Lista de Regras de Composição naquilo que toca a composição de um módulo, sem jamais perder a coerência com a lógica de um processo construtivo.

  Tarefa 2 - Criação de campos editáveis no Modelo Paramétrico: inserção de chaves seletoras que permitam a visualização de um projeto a partir da inserção de dados elementares, nomeadamente o número de quartos e o tipo de planta.

Tarefa 3 - Abertura de possibilidades para alterar painéis de todos os projetos simulados: geração de chaves seletoras combinadas ao projeto gerado via seleção de números de quartos e tipo de planta. Essas chaves seletoras podem gerar aberturas para personalizações, como troca de portas ou adição de novas janelas em paredes opacas exteriores.

Tarefa 4 - Geração da lista de elementos utilizados em cada projeto: geração de um código que permita visualizar o tipo e a quantidade de cada elemento inserido em um projeto.

Diante dos pacotes de trabalho definidos, foi estipulado o cronograma para o Caso de Estudo (Tab. 08), contendo as quatro etapas e a adição de tarefas complementares necessárias para a completude da tese.

Tab. 08: Cronograma de desenvolvimento do Caso de Estudo.

Etapa	Trabalhos a serem realizados
I	Coleta de informações e elaboração da Lista de Regras de Composição
II	Modelação de componentes baseados na Lista de Regras de Composição
III	Estudo de *software* paramétrico e experimentações
IV	Produção de Modelo Paramétrico que permita a projeção de uma habitação através de parâmetros e a exibição da lista dos elementos da habitação

3.6. DESENVOLVIMENTO DA METODOLOGIA

3.6.1 INTRODUÇÃO

A priori, cabe reforçar a relação direta entre dois dos produtos expectáveis do Caso de Estudo: a Lista de Regras de Composição e o Modelo Paramétrico. O segundo somente ganhou sua forma final por conta das diretrizes da primeira, enquanto a primeira somente foi realizada para permitir a criação do segundo. O objetivo sempre foi seguir o guião preestabelecido pela Lista de Regras de Composição, mas com ponderação: caso surgissem novas ideias e interpretações ao longo do desenvolvimento que se relacionassem mais com os temas abordados no Estado da Arte e essas agregassem valor ao projeto, de bom grado seriam aceitas e incorporadas.

Naquilo que tange o processo, há de primeiramente de se discorrer sobre o processo conceitual, que envolve as condicionantes que geraram a Lista de Regras de Composição (Etapa 1), Lista essa que absorve e sintetiza as informações outrora vistas, além das adequações funcionais e estéticas realizadas ao longo do desenvolvimento para que os produtos gerados pelo Modelo Paramétrico fiquem alinhados com os modos de produzir e construir da atualidade.

Posteriormente à apresentação da Lista de Regras de Composição está discorrido sobre as fases executivas (Etapas 2, 3 e 4) do Caso de Estudo. A organização dessas fases executivas foi bem definida para que seja entendida a linearidade do processo, podendo se entender o encadeamento das tarefas. No entanto, há de se entender que na prática a fase referente à modelação dos componentes (Etapa 2), a fase de importação dos elementos modelados no *software* paramétrico e experimentações (Etapa 3) e a fase

referente à criação do mecanismo (Etapa 4) ocorreram de forma simultânea em determinados momentos do desenvolvimento. Isso se justifica devida à intenção de se obter o melhor produto final possível, o que ocasionou regularmente retornar a tarefas anteriores já concluídas para se realizar readequações.

Dessa maneira, além de o desenvolvimento da Lista de Regras de Composição e o Modelo Paramétrico estarem apresentados neste capítulo de uma maneira direta, com foco na explicação das tarefas executadas e com referências ao que foi encontrado no Estado da Arte, o relatório de atividades para o desenvolvimento do Modelo Paramétrico também está apresentado como anexo (ANEXO I), um documento que mostra as tarefas e passos tomados em cada uma delas.

3.6.2 Elaboração da Lista de Regras de Composição

A fim de se elaborar a Lista de Regras de Composição, inicialmente foi visto como facilitadora a divisão do conteúdo do Estado da Arte em grupos, incorporando em cada um desses todo o tipo de informação específica encontrada. Após analisar o que poderia encorpar a Lista de Regras de Composição, entendeu-se o conteúdo pode ser decomposto em três grupos:

- **Estratégia de Modulação**, que dita regras sobre a unidade modular e a grelha do módulo;
- **Estratégia de Evolução**, que dita como a habitação poderá evoluir;
- **Definição dos Componentes**, que dita a forma e material dos componentes.

A integração desses grupos foi tida como essencial para o sucesso do Modelo Paramétrico, tendo se em vista a maneira com que tudo se entrelaça.

- Estratégia de modulação

A ordem natural foi iniciar o processo pela definição da grelha e da unidade modular, visto que enquanto a grelha diz respeito a como os componentes são acondicionados na planta (sejam esses estruturais ou não), a unidade modular diz respeito a quais componentes poderão ser dispostos na construção (Fig. 48).

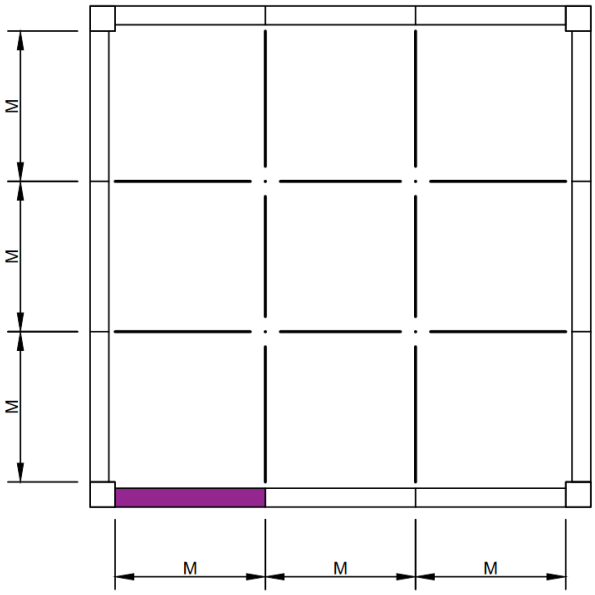


Fig. 48: Exemplo de grelha modular de 3M x 3M, onde cada M diz respeito a uma unidade modular e a marcação em roxo diz respeito a um elemento modular posicionado.

Segundo Smith (2010, 125), *"(...) sistemas estruturais são mais frequentemente posicionados em grelhas axiais, enquanto painéis e módulos geralmente são desenvolvidos em grelhas modulares"*. Dessa maneira, ao se considerar que um dos objetivos foi realizar a separação de estrutura e vedações, definiu-se como ideal a definição de duas grelhas distintas para cada compartimento, sendo basicamente a grelha modular em função da dimensão dos painéis e a grelha axial em função da dimensão dos painéis e dos pilares.

Foi optado por estabelecer a unidade básica (M) da grelha modular para 1200mm. Isso se deve à ampla gama de possibilidades de aberturas que podem ser inseridas em um painel com essa dimensão, há no mercado um amplo acervo de portas e janelas comerciais que vão de 600mm a 1100mm de largura. Com essa unidade estabelecida, optou-se por trabalhar a grelha modular de 3600mm x 3600mm (3M x 3M) (Fig. 49). Tal decisão deve-se, sobretudo, ao facto de que essa metragem é bastante corrente em projetos arquitetônicos, além de ser múltipla de 600mm. Ademais, a estruturação pensada para os compartimentos permite que um compartimento possa ser inteiramente anexado a outro(s). Dessa maneira, pôde-se posteriormente desenvolver as grelhas estruturais e de vedação.

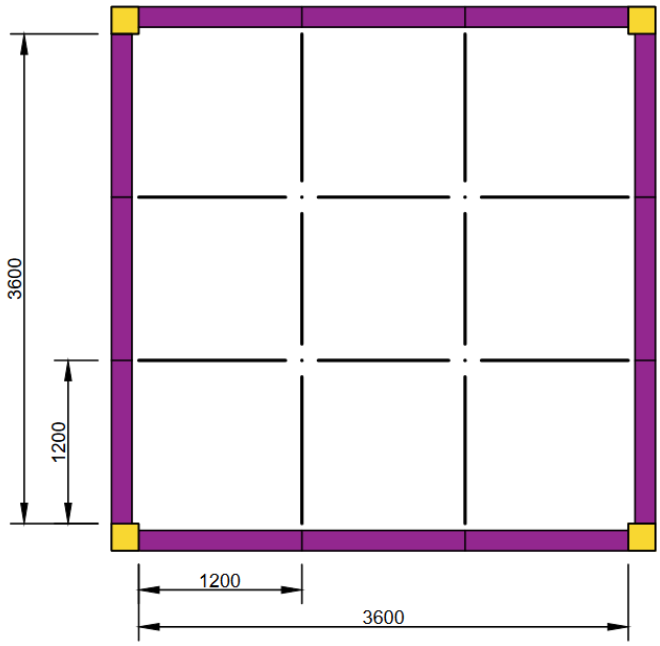


Fig. 49: Grelha modular, onde se vê em roxo a posição dos painéis intercambiáveis, sendo que cada um desses possui 1200mm (ou 1M) de dimensão lateral.

No que tange à grelha que coordena a estrutura, essa não recebeu uma unidade básica específica, mas foram definidas em função da grelha modular e da dimensão dos pilares, esse padronizado para 200mm. Desse modo, as dimensões totais dessa grelha axial é de 3800mm x 3800mm (Fig. 50), que corresponde ao 3600mm x 3600mm da grelha modular e um offset de 100mm em cada um dos vértices (visto que a intenção é que a linha da grelha passe no ponto central dos pilares de 200mm que ficam nos vértices do módulo).

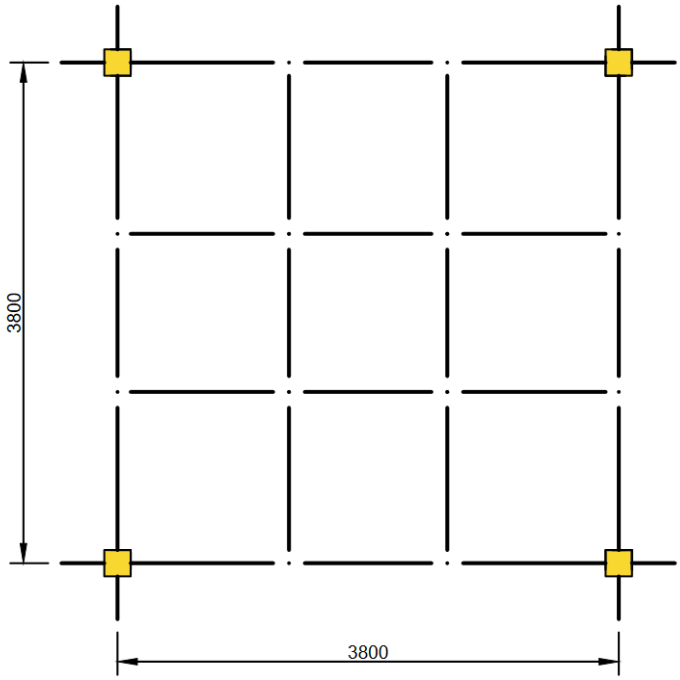


Fig. 50: Grelha estrutural, onde se vê em amarelo a posição dos pilares de 200mm x 200mm.

- ESTRATÉGIA DE EVOLUÇÃO

No que tange à adição de novos compartimentos ao Núcleo-base, foi decidido que aconteceria através da soma de blocos de metragem iguais aos anteriores. No que diz respeito aos compartimentos, foi decidido que a habitação sempre se desenvolveria ao redor de um núcleo principal (Núcleo-base). Esse núcleo é composto por dois compartimentos que foram nomeados de "Módulo Sala" (corresponde à entrada, sala de estar e copa) e "Módulo Hidráulico" (corresponde uma cozinha e uma instalação sanitária) (Fig. 51).

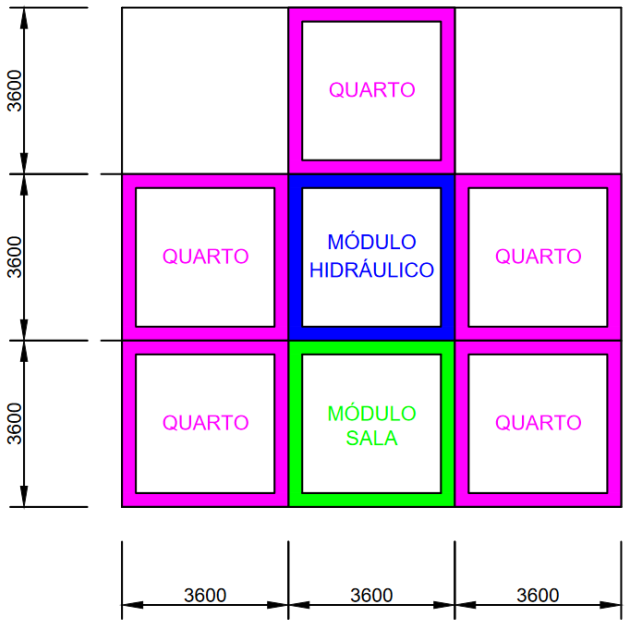


Fig. 51: Esquema de evolução com Núcleo-base (Módulo Hidráulico e Módulo Sala) e possíveis posições de quartos.

De acordo com este esquema de evolução, foi definido que a habitação foi poderia ter quatro tipologias (Tab. 09).

Tab. 09: Tipologias e seus módulos constituintes.

Nomenclatura	Módulos
T1	Núcleo-base e módulo de um quarto
T2	Núcleo-base e módulos de dois quartos
T3	Núcleo-base e módulos de três quartos
T4	Núcleo-base e módulos de quatro quartos

Importante mencionar que através dessas quatro tipologias e o esquema de evolução se supôs que o projeto poderia assumir diferentes desenhos de plantas, sendo a singularidade de cada um desses desenhos definida a partir de qual parede do Núcleo-base que receberia o módulo de quarto adicional. Foi expectável, portanto, que ao longo do desenvolvimento do Modelo Paramétrico o desenho e a quantidade dessas plantas fossem descobertos.

- DEFINIÇÃO DOS COMPONENTES

Segundo Smith (2010, 127), *"(...) a categorização de componentes, painéis e módulos é simplesmente um método organizacional para descrever um elemento pré-fabricado que é mais ou menos finalizado antes de chegar no local de construção"*. Dessa maneira, foi necessário além de se definir quais elementos iriam compor o Modelo Paramétrico, também categorizá-los. Ademais, é necessário se ater à métrica estipulada e se perceber quais elementos se relacionam diretamente. Foi elaborado um fluxograma (Fig. 52) que apresenta a relação entre os grupos de elementos, relação essa baseada em regras construtivas correntes. Posteriormente em tópicos estão debatidos sobre cada um desses grupos.



Fig. 52: Relação entre os componentes distintos de uma edificação.

FUNDAÇÃO

Sendo essa uma das tarefas primárias na construção, entendeu-se de que fosse o único grupo de elementos que parte fosse construída de forma *in situ* devido às características únicas de relevo que cada terreno pode apresentar, o que exige um estudo preliminar individualizado e uma execução adequada a cada contexto. Por conta disso, definiu-se que a fundação fosse feita de sapatas de concreto moldadas *in situ*, que se situariam no mesmo eixo dos pilares de cada módulo (por uma mera questão de lógica construtiva), que se projetariam 150mm acima do nível do solo para facilitar a passagem de infraestruturas e teriam um anteparo com parafusos em sua face superior para realizar conexões rosqueadas com os pilares.

- ESTRUTURA

Optou-se pela desconexão da estrutura com os painéis de vedação, assim como nos modelos na célebre Casa Dominó de Le Corbusier (Rangel, Bárbara 2013, 81–82). Segundo as definições de Smith relacionadas aos tipos de estrutura (Smith 2010, 100), esse modelo é conhecido por *Rigid Frame*. Nesse contexto, a estrutura ganha um papel duplo, não de apenas sustentar a cobertura, mas também de ser um receptáculo para os painéis de vedação (Fig. 53).

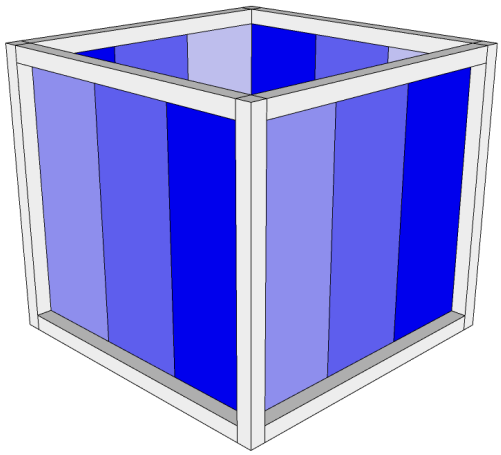


Fig. 53: Simulação da volumetria, onde se vê a estrutura em branco e painéis coloridos desvinculados de 1200mm (1M) de largura cada.

O material definido para realizar a estrutura foi a madeira laminada cruzada (CLT). Tal escolha deve-se ao facto desse material ser amplamente utilizado em habitações industrializadas, sendo facilmente encontrado em diversos países da Europa e das Américas, e ter fácil articulação com outros sistemas construtivos. Além disso, é um material de baixo peso e volumetria ao se considerar sua alta resistência às cargas e sua boa performance térmico-acústica. Ademais, esse material também traz a vantagem de poder ser transformado em elementos construtivos através de equipamentos CNC automatizados, o que potencialmente gera economia de tempo e permite menor geração de resíduos.

Ao passo que, segundo Smith (2010, 215), *"(..) conexões de rosca e parafuso ou conexões que permitem desmontagem têm mais facilidade em serem reciclados",* optou-se por vigas e pilares que fossem conectadas por parafusos, evitando-se a utilização de conexões de solda (comum nos projetos em *light steel framing*) ou conexões químicas (comum na construção em madeira quando se usa colas para afixar painéis e revestimentos). Por fim, há de se citar que a estrutura tem perfis de vigas e pilares estipulados para 200mm. Essa dimensão gera uma boa flexibilidade para encaixe de painéis de vedação de diferentes espessuras, bem como proporciona adequado suporte para receber as cargas do piso de cobertura/laje e do telhado de cobertura.

- INFRAESTRUTURA

Neste Caso de Estudo se optou por desenvolver sistemas com a maior simplificação possível, com foco em flexibilidade de movimentação na planta da edificação e foco em produção *off-site*. Inspirado pela ZIP House, onde a habitação é elevada por palafitas para se adequar a terrenos distintos e gerar espaços inferiores para a passagem de infraestruturas (Rangel, Bárbara 2013, 86–88), se definiu que neste projeto poderia ser lançada a mesma estratégia ao se utilizar um espaço vazio de 500mm de altura entre o piso e o solo (Fig. 54). Naquilo que toca as instalações elétricas, os conduítes poderiam ser distribuídos por baixo de toda a edificação, e, ao chegarem ao ponto de destino, poderiam subir por dentro de rasgos nos blocos de parede.

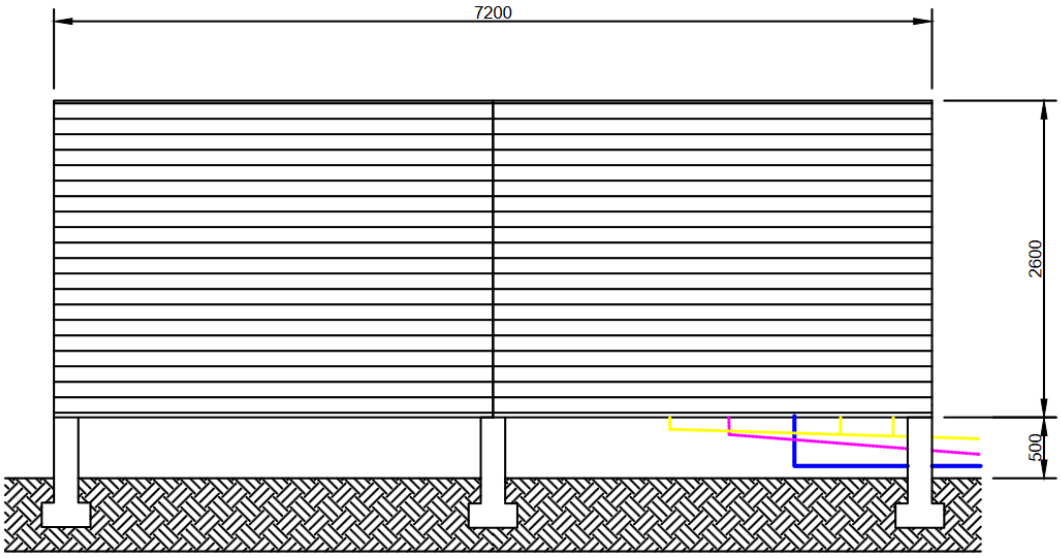


Fig. 54: Esquema de habitação suspensa para a passagem de tubulações abaixo.

Relativamente à alimentação de água e a saída do esgoto, entendeu-se que a mesma estratégia de distribuição poderia ser tomada. No entanto, viu-se a necessidade de desenvolver um componente específico destinado aos pontos de utilização. Foi definido que deveria ser criada a Parede Hidráulica, um elemento que além de servir como divisor de compartimentos, teria função infraestrutural para servir à casa de banho e à cozinha. Essa parede foi pensada ser em CLT com estruturação *wood frame*, o que possibilitaria conter tubulações internas para a alimentação de água nos seguintes pontos (Fig. 55):

- I - Aquecedor-depósito de água quente (situado na laje da edificação);
- II - Pia do banheiro;
- III - Pia da cozinha;
- IV - Vaso sanitário;
- V - Duche.

Notoriamente, essa parede também deveria contém tubulações de esgotamento sanitário. Essas tubulações servem para a saída dos seguintes pontos (Fig. 56):

- I - Pia do banheiro
- II - Pia da cozinha;
- III - Vaso sanitário;
- VI - Duche.

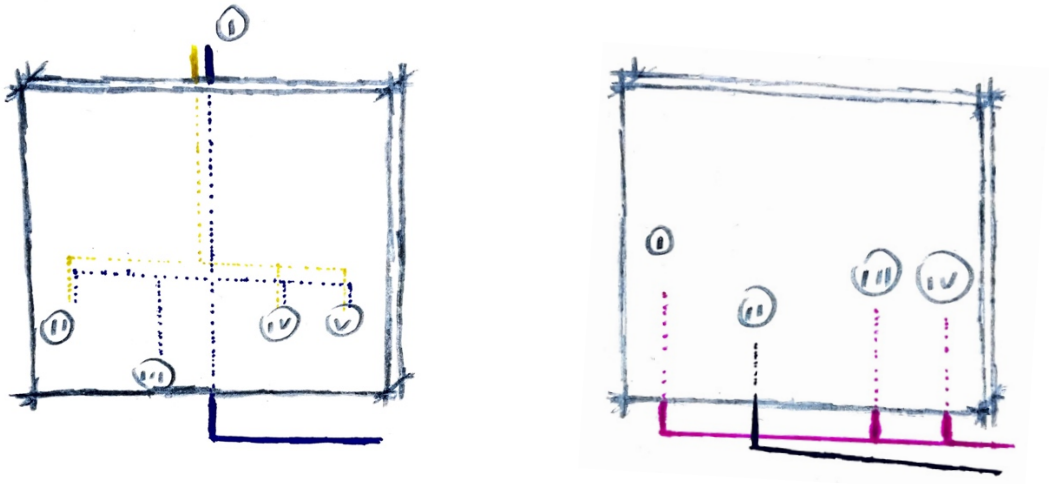


Fig. 55: Esboço inicial de alimentação de água e esboço de saída de esgoto da Parede Hidráulica.

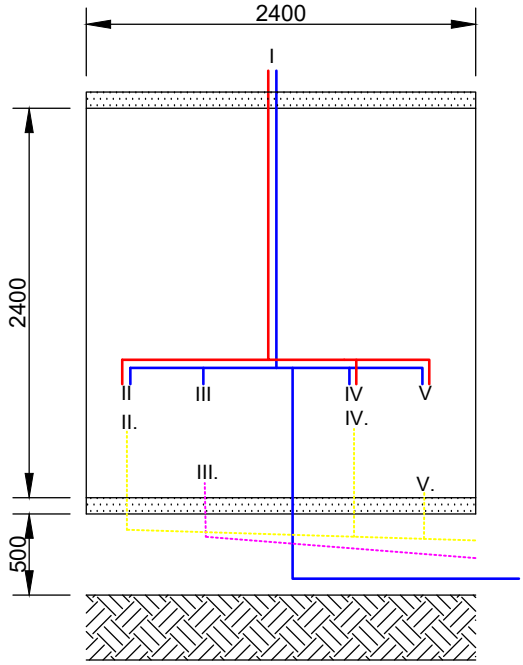


Fig. 56: Esquema da tubulação definida para a Parede Hidráulica.

Ao passo que a grande quantidade de tubulações envolvidas parede poderia causar incompatibilidades por questões espaciais, se definiu que a tubulação de esgoto do vaso sanitário (de maior espessura) não deveria adentrar na Parede Hidráulica para posteriormente descer até o espaço livre abaixo da edificação, mas deveria descer diretamente pelo próprio piso de instalação. Ademais, cabe destacar a espessura e material das tubulações: os tubos de abastecimento são de PVC e têm 25mm de diâmetro, os tubos de saída das pias e área de banho têm esse material e são de 40mm, o tubo de esgotamento do vaso sanitário é de 90mm. Relativamente às tubulações de água quente, têm a mesma dimensão dos tubos de abastecimento e são em PEX (polietileno reticulado).

Por fim, naquilo que se refere à ventilação da casa de banho, se definiu que por defeito ela aconteceria por extração mecânica através de abertura no painel de cobertura. Tal definição foi tomada por precaução, visto que se entendeu que ao longo do desenvolvimento do Modelo Paramétrico poderia surgir alguma conformação de planta que impossibilitaria a instalação de janela na casa de banho.

- ESTRUTURAÇÃO DO PISO

Devido à laje de piso ser conformada por diversos blocos, foi necessário pensar na melhor estruturação para acomodá-los. Devido às limitações espaciais das caixas de 25,2m^3, 35m^3 e 55m^3 dos camiões mais usuais (Rangel Logistics Solutions, 2024), a estrutura do piso de cada módulo não pode ser definida como inteiriça, necessitou ser decomposta: definiu-se assim que cada estrutura teria três quadrículas vazadas de 3600mm x 1200mm, que seriam feitas em perfil metálico de 50mm. Ao serem conectadas, portanto, as três quadrículas formariam uma estrutura de 3600mm x 3600mm, que viria a ser instalada entre as vigas e rente à face superior das mesmas. Desse modo, o piso ficaria disposto internamente ao módulo, sendo sustentado apenas pelas quadrículas: o que geraria faces livres sobre as vigas e assim as proporcionaria receber os painéis de vedação.

- TELHADO

No que tange o telhado, se optou por modelá-lo como um componente desconectado da estrutura e da laje de cobertura. Foi decidido que dividir o telhado de cada módulo em 3 seções de 3600mm x 1200mm (3M x 1M) cada (Fig. 57) seria uma opção viável para transporte em camiões com caixa de 25m^3 (Rangel Logistics Solutions, 2024), de modo que as seções sejam agregadas no momento da construção *in situ*. Também se optou por fazer três tipos de fechamento para. telhado: fechamento lateral esquerdo, fechamento lateral direito e fechamento traseiro. Desse modo, esses fechamentos poderiam ser utilizados em um determinado módulo de acordo com a configuração da habitação e a disposição dos outros módulos. Foi definido que a cumeeira e o beiral teriam uma diferença de altura de 500mm, o que signitica que o telhado teria a inclinação de 13,88%. Ademais, foi definido que a cobertura superior do telhado seria em telha metálica e a estrutura seria executada em madeira CLT.

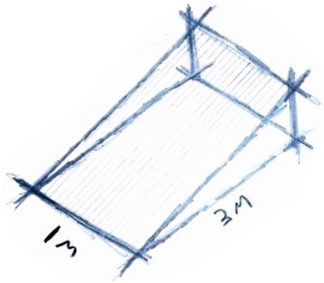


Fig. 57: Esboço de uma seção do telhado.

- PAINÉIS DE PISO, VEDAÇÃO E COBERTURA

Inspirado pelo sistema de blocos *U-Build* do *Studio Bark* (*U-Build*, 2024) (Fig. 58), foi criado um sistema de blocos para o Modelo Paramétrico do Caso de Estudo.

Fig. 58: Bloco *U-Build* explodido sem a face frontal.

(Fonte: U-Build, 2024).

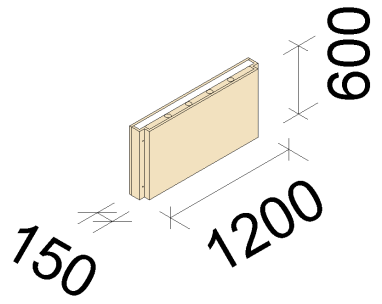
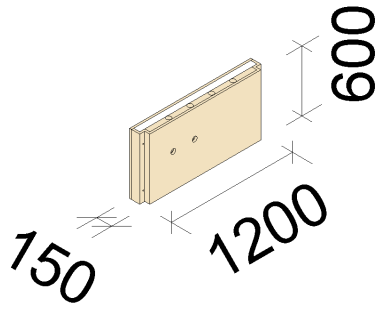
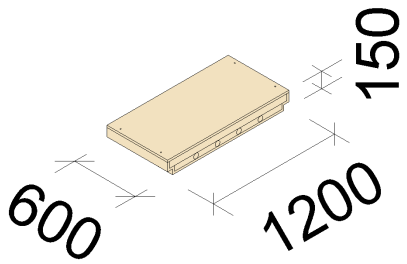
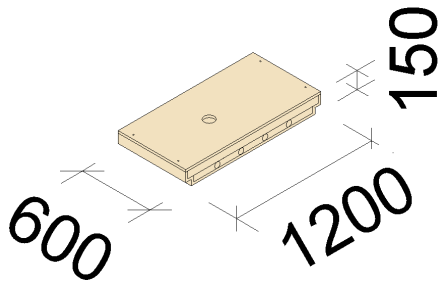
A adoção desse sistema de blocos se justifica pelo interesse de utilizar blocos de configurações e dimensões similares para paredes, laje de piso e laje de cobertura, estratégia que tenderia a facilitar o processo produtivo, o processo de montagem e unificação das três dimensões do módulo em função de um múltiplo comum (M = 1200mm). Além disso, decompor elementos de grande porte (paredes e lajes) em componentes menores tenderia a facilitar o transporte e a montagem com equipas reduzidas. Dessa maneira, os blocos foram modelados conforme a tabela abaixo (Tab. 10):

Tab. 10: Necessidades, motivos e soluções adotadas para a modelação do bloco padrão.

Necessidade	Motivo	Solução
Elementos de parede, piso e laje de cobertura em dimensões reduzidas e em "escala humana"	Tornar o transporte e montagem mais fáceis	Definição de um modelo de bloco de 1200mm (comprimento) x 600mm (altura) x 150mm (espessura)
Elementos de parede, piso e laje de cobertura que sejam fáceis de serem montados e desmontados dos elementos *in situ*	Permitir a readequação espacial de forma mais célere, mesmo que seja executada por apenas uma pessoa	Blocos aparafusados à estrutura, instalação intuitiva de "bloco sobre bloco" dentro de montantes com metragem exata
Ter um elemento de dimensões únicas para ser utilizado nos contextos de paredes, piso e laje de cobertura	Tornar a produção menos propensa a falhas, sistematizar o transporte, tornar a montagem mais intuitiva	Definir uma métrica padronizada para encaixe dos blocos nas paredes, piso e cobertura, gerando montantes de parede de vedação, vigas de laje de piso e cobertura com espaçamentos similares

Dessa maneira, o trabalho inicialmente convergiu na criação de um bloco padronizado para parede, que seria composto de camadas externas em madeira CLT, feita a partir de chapas de 20mm de espessura, e interior em EPS, feito de chapas de 60mm de espessura (Tab. 11). Posteriormente foi necessário pensar como esses blocos poderiam se agregar à estrutura. Se definiu que os blocos deveriam ter um volume adicional de 50mm de espessura para gerar um chanfro, de modo que os blocos pudessem ser parafusados a montantes dispostos nas faces externas. Aproveitou-se nesse volume adicional, que seria em CLT maciço, para fazer a disposição de 4 furos transversais para a passagem de tubulações. No que diz respeito aos pisos, esse bloco não se mostrou interessante para a utilização, visto que a combinação de materiais não seria resistente o suficiente para o trânsito de pessoas e disposição de mobiliário. Foi definido, portanto, que nos blocos de piso o exterior em madeira poderia ser utilizado, mas o material isolante em EPS deveria ser trocado por um volume maciço em CLT, provendo assim maior resistência (Tab. 11). Para realizar o encaixe, poderiam ser dispostas vigas metálicas no piso, realizando a mesma função dos montantes. Em seguida, percebeu-se que também havia a necessidade de serem criados blocos com buracos na face para a passagem de infraestruturas elétricas e hidráulicas (Tab. 11), visto que enquanto a o bloco da parede necessita de rasgos na face principal para a disposição de interruptores e saída de água, o bloco das lajes necessita de rasgos na face principal para a instalação de tubo de esgoto e caixas de iluminação.

Tab. 11: Blocos.

Bloco para utilização em:	**Imagem**
Parede	
Parede com buraco para tubulações	
Piso	
Piso com rasgo para tubulação de esgoto	

Convencionou-se chamar por Bloco Padrão o bloco por defeito que tem material isolante em EPS, e por Blocos Específicos os blocos que necessitam um diferente material interno ou rasgo para responder a alguma demanda funcional da edificação. Desse modo, todos os blocos partilhariam uma mesma casca, o que geraria ganhos nas etapas de produção devido à repetição e no pós-vida da edificação devido à possibilidade de reutilização em diferentes contextos.

- LISTAGEM DOS COMPONENTES

Após as reflexões acima, chegou-se à uma listagem prévia dos componentes (Tab. 12), essa que embasaria a elaboração dos objetos modelados virtualmente e seriam inseridas em um *software* de *design* paramétrico.

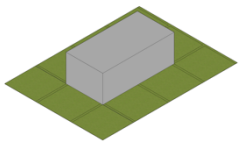
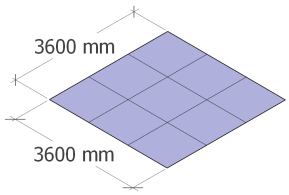
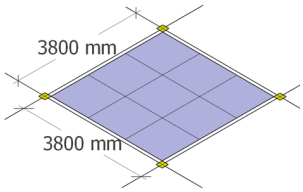
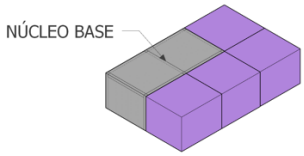
Tab. 12: Listagem dos componentes e suas características principais.

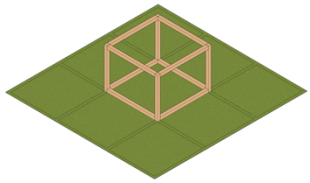
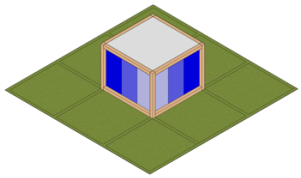
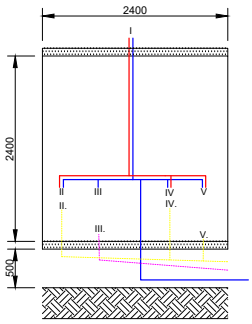
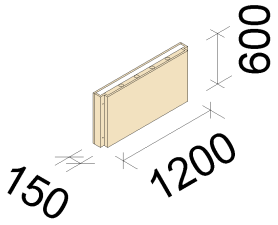
Elemento	Dimensões	Características
Fundação	As mesmas dimensões dos pilares dos módulos	Fundação corrente, com sapatas em betão armado moldadas no local da obra
Estrutura	3800mm de largura x 3800mm de comprimento x 2800mm de altura.	Em CLT e em perfil quadrado de 200mm x 200mm.
Infraestrutura	- Bloco Específico de 1200mm x 600mm x 150mm com passagem para dutos e tubos; - Bloco Específico de 1200mm x 600mm x 150mm com furação para caixa de luz; - Bloco Específico de 1200mm x 600mm x 150mm para utilização em laje de piso; - Parede Hidráulica de 2400mm de altura x 2400mm de comprimento x 1200mm de largura.	Blocos com rasgos internos para a passagem de tubulações e infraestruturas, Bloco com preenchimento em CLT para utilização em piso; Parede Hidráulica com estruturação e tubulações para loiças de casa de banho e cozinha.
Cobertura	3 telhados de 3600mm x 1200mm, com inclinação de aproximadamente 14%.	Telhas em chapas metálicas e estruturação em CLT
Bloco	- Bloco Padrão de 1200mm x 600mm x 150mm.	Blocos com chapa exterior em CLT e interior em EPS.
Painéis com aberturas	- Painel de 2400mm x 1200mm com porta de 800mm de largura x 2100mm de altura; - Painel de 2400mm x 1200mm com porta de 600mm de largura x 2100mm de altura; - Painel de 2400mm x 1200mm com janela de 800mm de largura x 800mm de altura; - Painel de 2400mm x 1200mm com janela de 1000mm de largura x 1000mm de altura; - Painel de 2400m x 1200mm com janela de 1000mm de largura x 2000mm de altura; - Painel de 1200mm de largura com guarda corpo de 1000mm de altura	

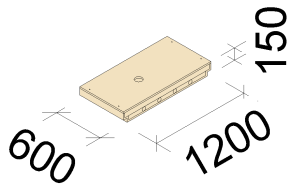
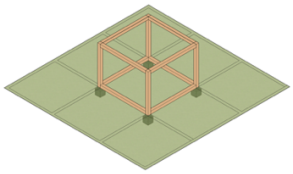
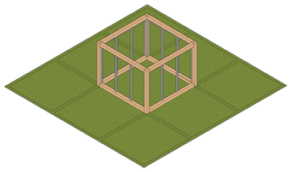
3.6.3 Apresentação da Lista de Regras de Composição

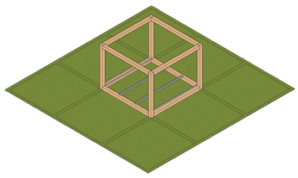
Após a reflexão de todo o conteúdo exposto no tópico anterior, pôde ser criada a Lista das Regras de Composição (Tab. 13). A lista também traz consigo o enquadramento das regras, isto é, o que ela tende a impactar no projeto, além de também a justificativa para a utilização das regras.

Tab. 13: Lista de Regras de Composição.

Nº	Regra	Define	Fase	Justificativa	Imagem
1	A edificação deve começar a partir de um Núcleo-base.	Forma da edificação	Projeto arquitetónico	Lógica construtiva corrente	
2	As fachadas da edificação devem ser inseridas em uma grelha de 3600mm x 3600mm, que deve possuir uma unidade métrica (M) predefinida de 1200mm.	Forma da edificação	Projeto arquitetónico	Lógica da construção modular - panelização	
3	A estrutura da edificação deve ser inserida em outra grelha, que é estrutural e possui 3800mm x 3800mm	Forma da edificação	Projeto estrutural	Lógica da construção modular - estrutura	
4	Edificação deve evoluir em módulos de metragem similar aos módulos do Núcleo-base	Evolução da edificação	Projeto arquitetónico	Lógica da construção evolutiva tradicional	
5	Edificação deve evoluir “em linha”, até chegar à quantidade máxima de 6 blocos (2 x 3)	Evolução da edificação	Projeto arquitetónico	Lógica da construção evolutiva e racionalização da planta	

6	O núcleo base e os módulos adjacentes devem possuir vigas e pilares em CLT com perfil de 200mm x 200mm	Estrutura dos módulos	Projeto estrutural	Estrutura resistente o suficiente para receber cargas de painéis e telhados	
7	A estrutura deve ser desconectada das fachadas	Organização dos elementos construtivos	Projeto estrutural	Flexibilização das paredes de vedação	
8	As infraestruturas devem ser direcionadas à habitação até um espaço entre o solo e o piso e devem evoluir verticalmente através dos blocos	Abastecimento e saída de água, instalações elétricas e de comunicações	Projeto hidráulico	Facilitação de montagem e desmontagem, facilitação de atualização e facilitação de manutenção	
9	Com exceção da Parede Hidráulica, nenhum dos elementos deve superar as dimensões de 2120mm (altura), 2100mm (largura) e 5400mm (comprimento)	Transporte dos elementos restantes do galpão de produção ao sítio de construção	Projeto arquitetónico	Foco em adequar os elementos à caixa do camião de 25,2m^{3,} modelo bastante utilizado para transporte de mercadorias	-
10	Deve ser definido um Bloco Padrão e Blocos Específicos, todos esses contendo chapas externas de materiais e dimensões similares	Vedações da edificação	Projeto arquitetónico	Foco em gerar um bloco com metragem universal, o que facilita a produção, racionaliza o processo de transporte e torna a montagem *in*	

				situ exequível para um grupo reduzido de montadores	
11	Devem ser definidos painéis pré-fabricados contendo variados perfis de aberturas, sendo que esses devem ter dimensões laterais baseadas na unidade modular e altura baseada no pé-direito da construção	Vãos de acesso e vãos envidraçados	Projeto arquitetónico	Foco em produção *off-site* de elementos de maior complexidade e foco de criar painéis que sejam intercambiáveis na habitação	-
12	O Núcleo-base e os módulos adjacentes devem ser dispostos sobre uma fundação de sapatas de betão armado, sendo cada uma no eixo dos pilares	Assentamento dos módulos	Montagem	Facilitação da construção em relevos distintos	
13	Os blocos para paredes externas devem ser aparafusados em montantes verticais, esses que devem ser afixados à estrutura, sendo que o espaçamento dos montantes deve ser correspondente à mesma unidade modular dos blocos	Fechamento da edificação	Montagem	Maior estabilidade das paredes externas	

14	Devem ser projetados painéis metálicos externos à construção	Fechamento da edificação	Montagem	Proteção contra intempéries, aumento da segurança contra invasões e vandalismos e reforço no isolamento térmico-acústico	-
15	Os blocos para piso de cada módulo devem ser dispostos e aparafusados sobre montantes que ficam no espaço interior das vigas, de modo que assim a modulação seja mantida e os painéis de vedação possam se assentar completamente sobre as vigas	Organização dos elementos construtivos	Montagem	Estabilidade mecânica do piso, modulação e melhor encaixe dos elementos construtivos	
16	A estrutura deve ter suas vigas e pilares unidos por parafusos	Estrutura dos módulos	Montagem	Facilitação de montagem e desmontagem, além de facilitação da reciclagem de elementos	-

Através das informações dispostas nesta lista puderam ser realizados esquiços (Fig. 59 e 60), esses que anteviram a provável volumetria de uma edificação que poderia ser gerada através do Modelo Paramétrico.



Fig. 59: Esboços de volumetria.



Fig. 60: Esboços de habitação.

3.6.4 DESENVOLVIMENTO DA MODELAÇÃO DOS ELEMENTOS

No que se diz respeito à modelação, a utilização do *Revit* foi uma alternativa relativamente fácil de ser tomada. É um *software* altamente utilizado por profissionais da construção civil. Contém diversas funcionalidades, sendo algumas dessas a união de equipas multidisciplinares no mesmo projeto, a possibilidade de atribuição de informações a todos os elementos modelados e a modelação 3D de maneira exata e fácil (Autodesk, 2024). Há de se pontuar que o *Revit* também é um *software* com capacidade de realizar projetos paramétricos, mas outra escolha foi feita para essa função: a combinação *Rhinoceros* + *Grasshopper* (Fig. 61). Essa se mostrou interessante devido ao facto de também ser altamente reconhecido, e, segundo Banihashemi et al. (2018), lida bem com restrições, gera formas complexas com facilidade e concilia objetos próprios com outros objetos BIM criados em outros *softwares*. Outro ponto positivo é que a combinação *Rhinoceros* + *Grasshopper* não exige recursos informáticos avançados, um ponto que fortaleceu a escolha visto que assim o Modelo Paramétrico também poderia ser utilizado em computadores com configurações limitadas.

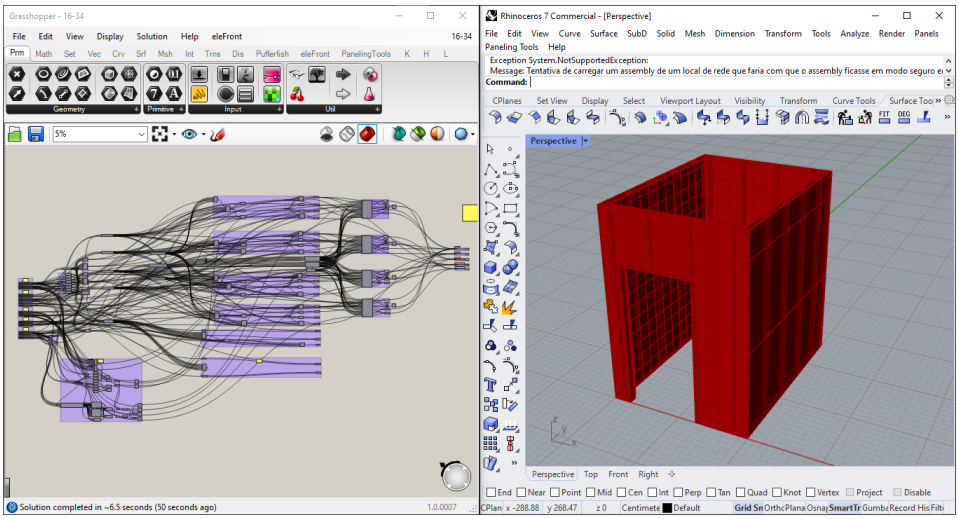


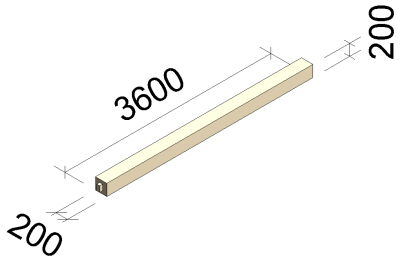
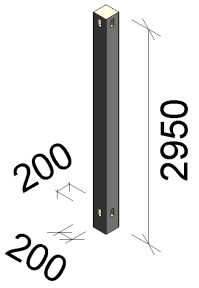
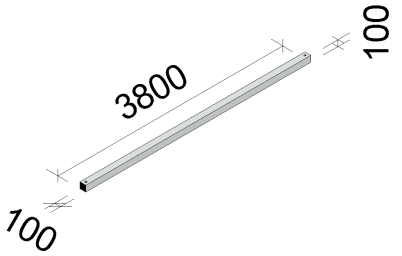
Fig. 61: Interface gráfica do *Rhinoceros* + *Grasshopper* (cadeia à esquerda e produto da cadeia à direita).

Há de se citar que o *Grasshopper* conta com uma larga biblioteca informacional na internet – em fóruns dedicados há constante troca de conhecimentos e modelos 3D já executados. Ao passo que a equipa de desenvolvimento do *Rhinoceros* em 2022 criou um *plug-in* para o *Revit* intitulado *Rhino.Inside.Revit*, esse que faz uma ponte entre os *softwares*, a combinação *Revit/Rhinoceros* + *Grasshopper* se mostrou bastante adequada.

- MODELAÇÃO

Como previsto, foi adotado o sequenciamento de etapas e tarefas dispostas no Plano Experimental (Capítulo 3.3). Desse modo, através da interface do *software Revit* destinada para a modelação de "Famílias" (elementos em três dimensões que compõem uma construção), foram inicialmente desenhados os elementos estruturais principais, nomeadamente a Viga e o Pilar, em madeira CLT, e a Viga de Piso, em aço (Tab. 14). Ao passo que o pilar seria um elemento que ficaria exposto às intempéries, o mesmo foi modelado com uma camada de revestimento em alumínio de 0,5mm de espessura.

Tab. 14: Elementos estruturais.

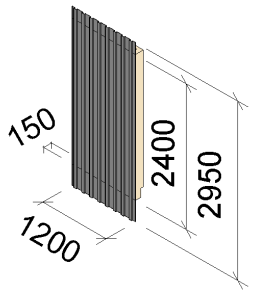
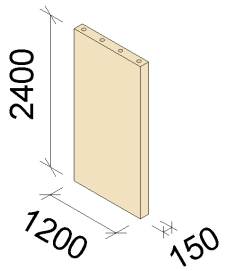
Elemento	Dimensões (altura, largura e espessura)	Destinação	Imagem
Viga	3600mm x 200mm x 200mm	Estruturação do módulo	
Pilar	2950mm x 200mm x 200mm	Estruturação do módulo	
Viga de estruturação do piso	3800mm x 100mm x 100mm	Estruturação do piso e recetáculo para placas de piso	

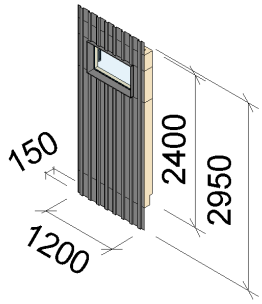
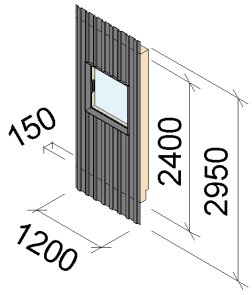
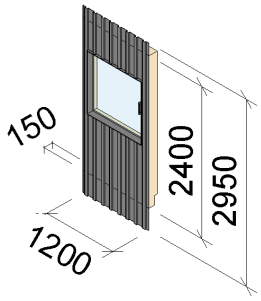
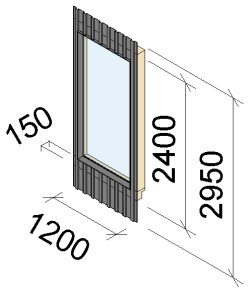
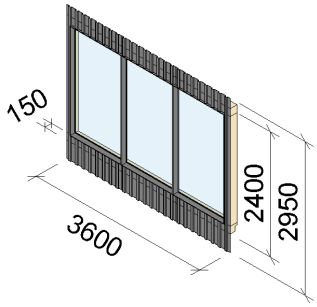
Posteriormente foram trabalhadas as vedações. Por mais que o sistema de blocos tenha se mostrado promissor, em um segundo momento o mesmo foi descartado devido às possíveis pontes térmicas que geraria, além da maior complexidade que ocasionaria aos montadores para encaixá-los perfeitamente, precisão essencial para ter resistência mecânica adequada. Dessa maneira, optou-se por criar um painel inteiriço para as paredes, com altura de 2400mm e largura de 1200mm (Tab. 15). Com essas dimensões, esses painéis ainda seriam facilmente transportáveis nas caixas de camiões de 25,3m^3. O facto da unidade modular de 1200mm também condicionar a altura (2400mm) faz com que o módulo apresente

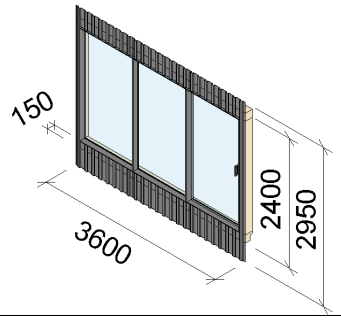
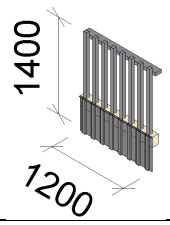
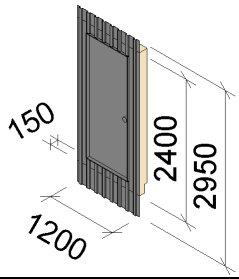
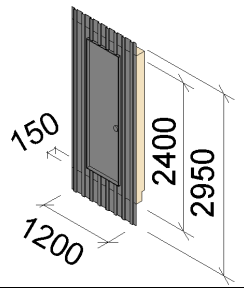
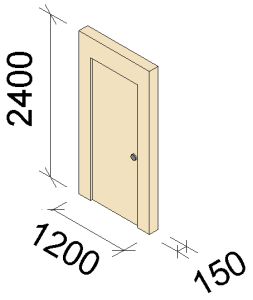
racionalização com essa alteração. Outro detalhe interessante é que a partir desse painel inteiriço seria possível produzir outros tipos de painel, visto que as dimensões externas seriam as mesmas, o que variaria seria somente o rasgo para porta e janela.

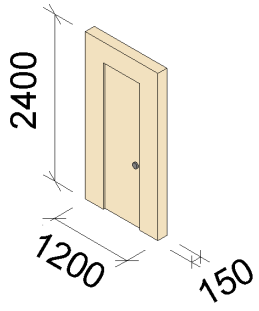
Dessa maneira, a espessura definida para o painel foi de 150mm, contendo 4 furos de 50mm de raio para a passagem de tubulações. Após a modelação desse painel inteiriço opaco, foram modelados outros painéis para parede, nomeadamente os painéis de janela de 800mm x 500mm, janela de 800mm x 800mm, janela de 1000mm x 1000mm, vidraça de 2000mm x 1000mm, porta de 2000mm x 800mm e porta de 2000mm x 600mm (Tab. 15). A fim de prover melhor isolamento contra intempéries e por questões estéticas, foi definido que esses painéis com aberturas e o painel opaco deveriam conter também uma chapa exterior metálica de 3mm de espessura. Também foi refletido que seria conveniente criar versões do painel opaco e dos painéis de porta sem a chapa externa, assim poderiam ser utilizados no interior da edificação (Tab. 15). Em um momento posterior às modelações desses painéis, surgiu a ideia de se criar mais dois tipos de painel, que de comum teriam o facto de serem inteiriços, terem panos de vidro e ocupariam toda a fachada de um módulo. Assim, surgiu o modelo de parede de vidro de 3600mm x 2950mm x 150mm e a parede de vidro de 3600mm x 2950mm x 150mm com porta de correr de 1000mm de largura (Tab. 15). Esses elementos agregariam maiores possibilidades de personalização e dariam maior sofisticação aos projetos gerados.

Tab. 15: Painéis do projeto.

Tipo de painel	Dimensões (altura, largura e espessura)	Destinação	Imagem
Opaco	2950mm x 1200mm x 150mm	Parede externa	
Opaco	2950mm x 1200mm x 150mm	Parede interna	

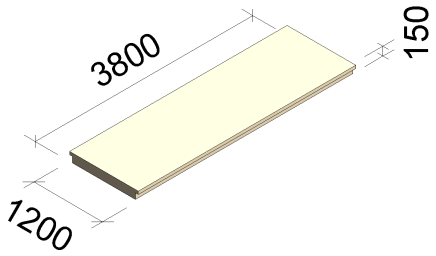
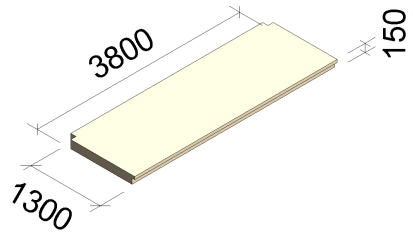
Janela	2950mm x 1200mm x 150mm; abertura de 800mm x 500mm	Parede externa	
Janela	2950mm x 1200mm x 150mm; abertura de 800mm x 800mm	Parede externa	
Janela	2950mm x 1200mm x 150mm; abertura de 1000mm x 1000mm	Parede externa	
Vidraça	2950mm x 1200mm x 150mm; abertura de 2000mm x 1000mm	Parede externa	
Parede de vidro	2950mm x 3600mm x 150mm	Parede externa	

Parede de vidro com porta	2950mm x 3600mm x 150mm; abertura de 2000mm x1000mm	Parede externa	
Guarda corpo	1000mm x 1200mm x 150mm	Parede externa	
Porta	2950mm x 1200mm x 150mm; com abertura de 2000mm x 800mm	Parede externa	
Porta	2950mm x 1200mm x 150mm; abertura de 2000mm x 600mm	Parede externa	
Porta	2400mm x 1200mm x 150mm; abertura de 2000mm x 800mm	Porta interna	

Porta	2400mm x 1200mm x 150mm; abertura de 2000mm x 600mm	Porta interna	

Tendo-se em vista que o bloco padrão também deixou de ser utilizado nas lajes de piso e cobertura, optou-se por criar dois novos modelos para essas situações: Laje de Piso (meio) em CLT de 3700mm de comprimento, 1200mm de largura e 100mm de espessura e Laje de Piso (cantos) em CLT de 3700mm de comprimento, 1300mm de largura e 100mm de espessura (Tab. 16). Desse modo, a composição de duas lajes de cantos e uma de meio poderiam ser agregadas e cobrir inteiramente um módulo de 3M x 3M.

Tab. 16: Lajes de piso.

Elemento	Dimensões (altura, largura e espessura)	Destinação	Imagem
Laje de Piso (meio)	3800mm x 1200mm x 150mm	Piso e laje de cobertura	
Laje de Piso (cantos)	3800mm x 1300mm x 150mm	Piso e laje de cobertura	

Posteriormente foram modelados outros elementos de interesse para o projeto. O primeiro foi desses foi a Parede Hidráulica, que foi executada conforme os esboços (Fig. 55) e o esquema (Fig. 56) previamente desenhados. Junto à parede foram anexadas as loiças da instalação sanitária (pia, vaso sanitário e área de banho) e a bancada com cuba em inox da cozinha. No entanto, após a modelação percebeu-se que a Parede Hidráulica teria problemas no transporte devido às suas dimensões e à baixa adesão de suas loiças sanitárias e componentes de cozinha, o que tenderia a ocasionar eventuais quebras e desconexões. Também foi identificada a necessidade de uma alça para o içamento desse componente. Dessa maneira, a Parede Hidráulica foi somada a um painel de piso de 3800mm x 1200mm e uma parede de suporte de 1200mm (largura) x 2500mm (altura), conformando assim o Módulo QB (quarto de banho) (Fig. 62, 63,

64 e 65). As dimensões do Módulo QB totalizariam 1200mm (largura), 2400mm (altura) e 3600mm (comprimento), volumetria transportável em camiões com caixa de 35m^3 (Rangel Logistics Solutions, 2024). Foi definido, ainda, que a bancada da cozinha com cuba em inox não faria mais parte desse conjunto: os elementos referentes à cozinha seriam enviados separadamente para serem instalados nas costas do Módulo QB no local da obra.

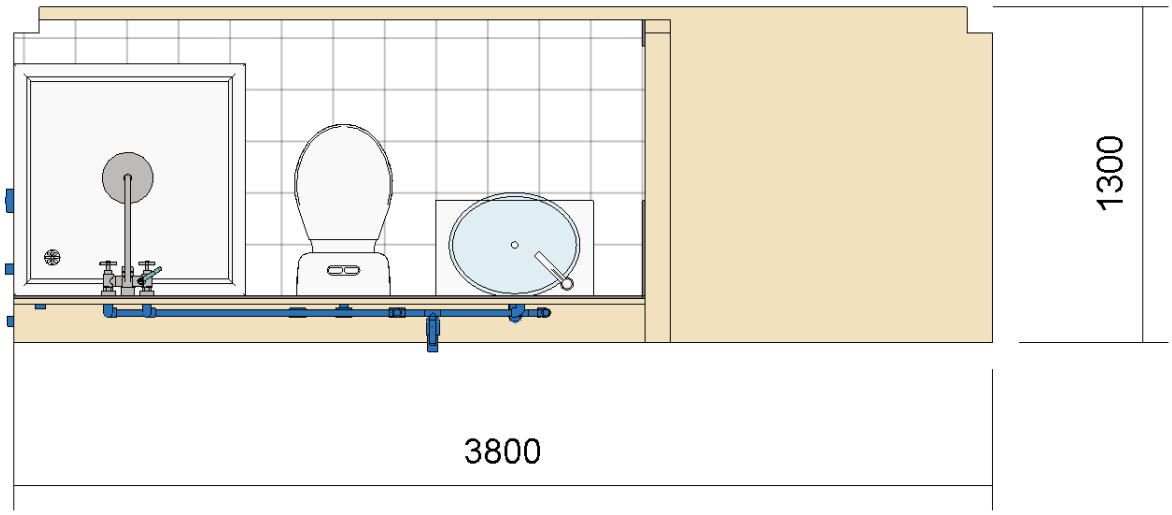


Fig. 62: Vista superior do Módulo QB.

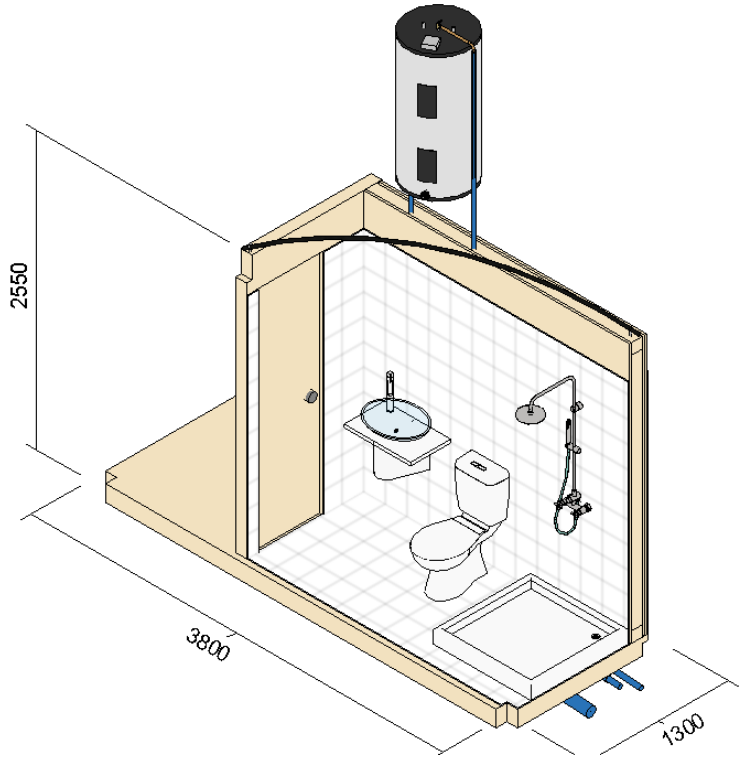


Fig. 63: Módulo QB completo.

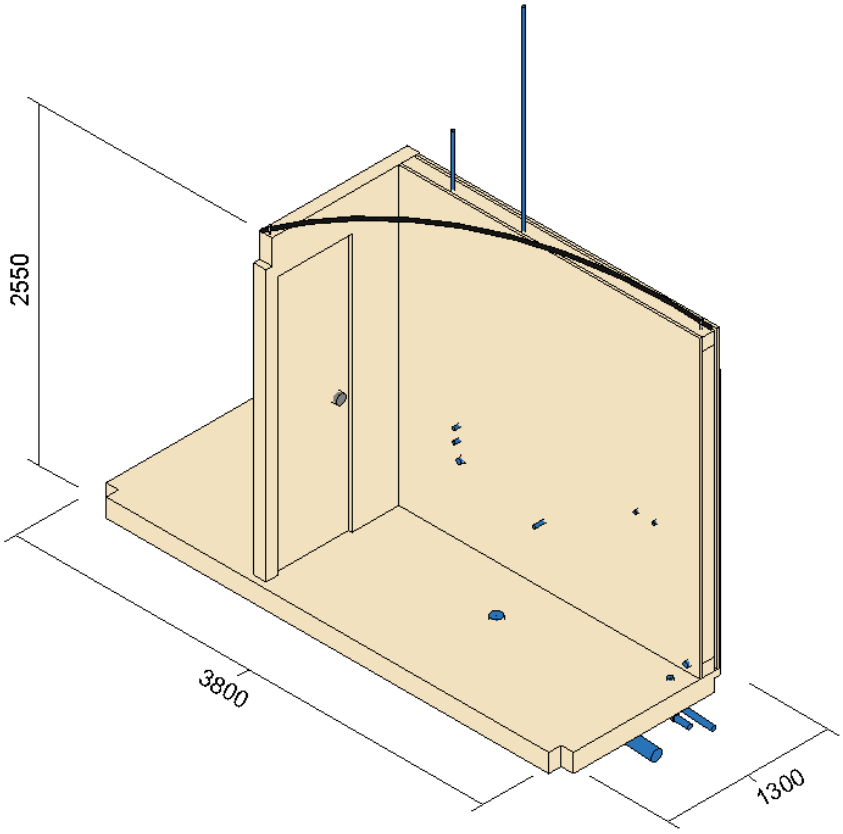


Fig. 64: Módulo QB sem revestimentos e equipamentos.

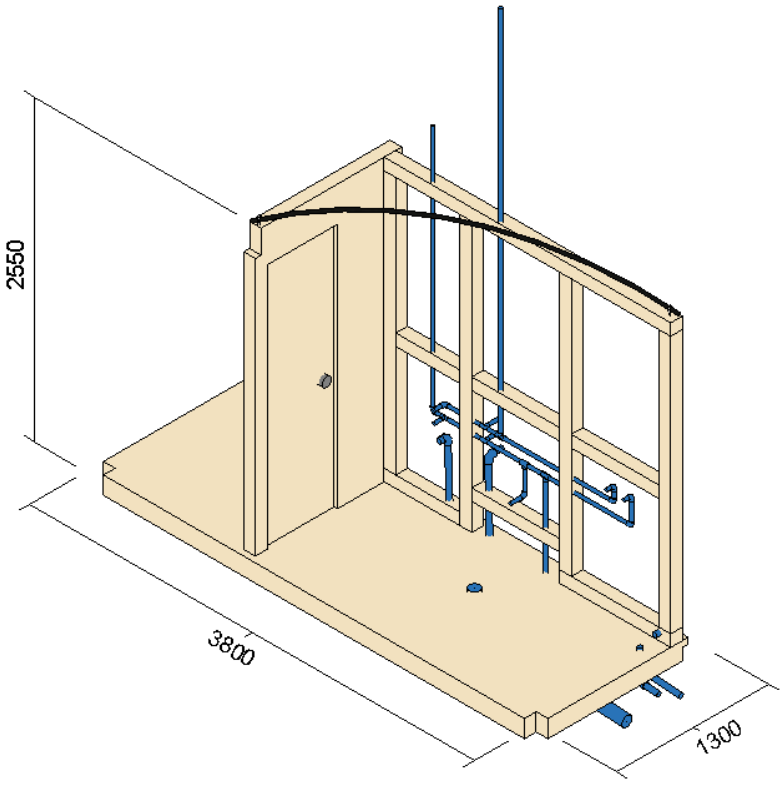
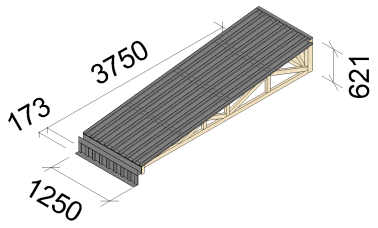
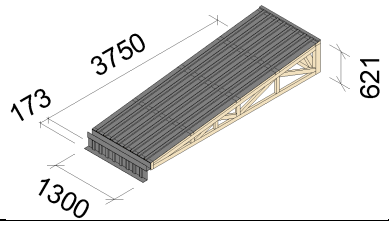
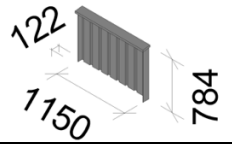
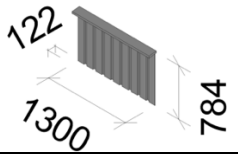
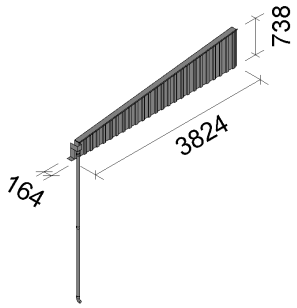
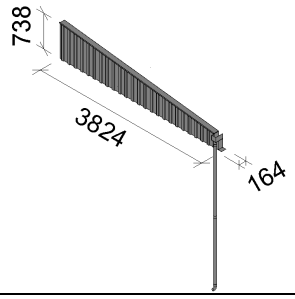


Fig. 65: Módulo QB com a parede aberta.

Em seguida foram desenhados os 6 componentes de telhado (Tab. 17). Para facilitar o transporte, o componente maior, exatamente o Módulo de telhado, foi delimitado em 3923mm de comprimento, 1250mm de largura e 621mm de altura total. A lógica da cobertura foi a mesma para as lajes de piso e cobertura, onde 3 unidades do Módulo de telhado seriam agregadas *in situ* para cobrir um módulo inteiro.

Tab. 17: Componentes de telhado.

Componente	Dimensões	Destinação	Imagem
Elemento Telhado (cantos)	3923mm (comprimento) x 1250mm (largura) x 621mm (altura) com calha frontal	Estruturação e proteção contra intempéries	
Elemento telhado (meio)	3923mm (comprimento) x 1300mm (largura) x 621mm (altura) com calha frontal	Estruturação e proteção contra intempéries	
Fechamento traseiro (cantos)	1150mm (comprimento) x 122mm (largura) x 621mm (altura)	Proteção contra intempéries	
Fechamento traseiro (meio)	1300mm (comprimento) x 122mm (largura) x 621mm (altura)	Proteção contra intempéries	
Fechamento direito	3824mm (comprimento) x 164mm (largura) x 738mm (altura) sem considerar o tubo de queda que é instalado *in situ*	Proteção contra intempéries	

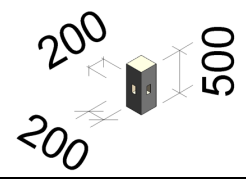
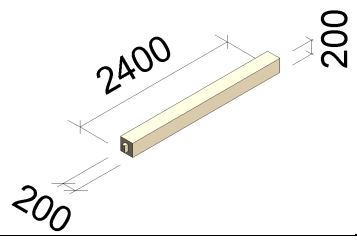
Fechamento esquerdo	3824mm (comprimento) x 164mm (largura) x 738mm (altura) sem considerar o tubo de queda que é instalado *in situ*	Proteção contra intempéries	

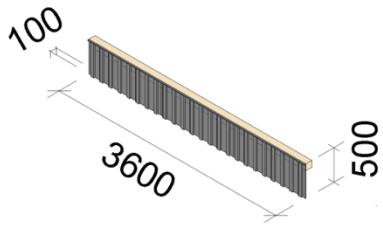
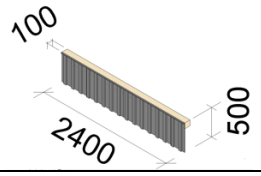
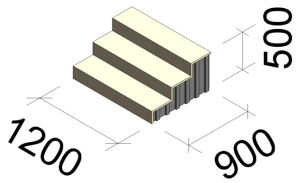
Com o desenho de todos os componentes se tornou possível a criação de 8 diferentes configurações de telhado, essas capazes de satisfazer todas as necessidades do projeto no que tange à cobertura:

- Telhado sem fechamentos;
- Telhado com fechamento traseiro;
- Telhado com fechamento esquerdo;
- Telhado com fechamento direito
- Telhado com fechamento esquerdo e direito;
- Telhado com fechamento esquerdo e traseiro
- Telhado com fechamento direito e traseiro;
- Telhado com fechamento esquerdo, direito e traseiro.

Por fim, foi concebida outra composição que poderia agregar bastante valor ao projeto: um *deck* externo que teria 3600mm, x 2400mm de piso (66% da área do módulo). Definiu-se que esse *deck* poderia incorporar as já criadas laje de piso de 3700mm x 1200mm x 100mm e a viga de 3600mm x 200mm x 200mm, restando apenas a criação de um Pilar de *deck*, uma Viga de *deck* e dois painéis de fechamento (Tab. 18). Adicionalmente, foi desenhada uma escada para acesso ao *deck* (ou acesso direto à edificação, caso não tenha *deck*). Essa escada teria pisos, espelhos e estruturação em CLT, além de chapas externas em aço para acabamento.

Tab. 18: Componentes de *deck*.

Componente	Dimensões	Destinação	Imagem
Pilar de *deck*	500mm (altura) x 200mm (largura) x 200mm (largura)	Estruturação	
Viga de *deck*	2400mm (comprimento) x 200mm (largura) x 200mm (altura)	Estruturação	

Fechamento frontal	3600mm (comprimento) x 100mm (largura) x 500mm (altura)	Proteção contra intempéries	
Fechamento lateral	2400mm (comprimento) x 100mm (largura) x 500mm (altura)	Proteção contra intempéries	
Escada	900mm (comprimento) x 1200mm (largura) x 500mm (altura)	Acesso ao *deck* ou à edificação	

Posteriormente às modelagens, foi realizada uma montagem dos componentes no *software Revit* (Fig. 66) a fim de se verificar se todos os componentes estavam se encaixando devidamente e se readequações seriam necessárias.

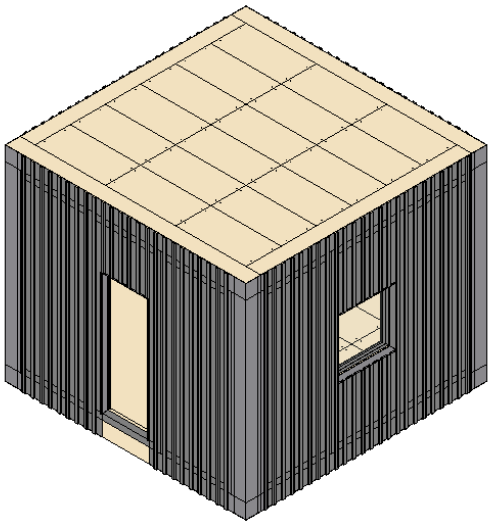


Fig. 66: Simulação de compartimento.

3.6.5 Inserção dos elementos modelados em software de design paramétrico

Através do *plugin Rhino inside Revit*, esse que após ser instalado se torna parte da interface do *Revit*, é possível aceder a uma nova aba onde se pode abrir o *Rhinoceros* (que seria o visualizador do projeto) e o *Grasshopper*. Relativamente ao *Grasshopper*, cabe destacar que o *software* trabalha com a linguagem da programação visual, onde pequenos blocos representam funções. Tais funções, a depender da

aplicação, tem potencial de executar alterações baseadas no conteúdo que está aberto no *Revit*. Em linhas gerais, dessa maneira se estipula a "ponte" desses *softwares*.

Há de se destacar sobre a estrutura das funções: essas são ligadas umas às outras através de fios *(Wires)*, e contém *inputs* (entradas) e *outputs* (saídas), sendo os *inputs* pontos referentes à entrada de informações em uma determinada função e os *outputs* ponto referentes à saída da informação que foi processada pelos blocos de funções. Neste trabalho convencionou-se a chamar esses pequenos blocos por **funções**, a junção de duas ou mais funções por **cadeia**, e as fórmulas criadas dentro de funções específicas por **códigos**.

Naquilo que diz respeito às funções, o *Grasshopper* conta com uma infindável biblioteca delas:

- Funções matemáticas (divisão, multiplicação, soma, subtração, etc);
- Funções vetoriais (destinadas a estipular um eixo específico para um sólido se mover);
- Funções geométricas (movimentação de sólidos, ampliação, redução, criação de vazios, extrusão, etc);
- Funções informacionais (criação de listas, medição de áreas, medição de volume, atribuição de categorias, etc);
- Funções de importação (importação de elementos modelados em outros *softwares*);
- Funções de *input* de dados pelo usuário (chaves seletoras com opções numéricas e alfabéticas);
- Funções para programação (*GHPython*, através da linguagem *Python*, permite escrever códigos com condicionantes específicas).

Ciente dessas funções, todos os elementos geométricos criados no *Revit* puderam ser inseridos no *Grasshopper*. Primeiramente foi realizado o experimento para a inserção de um painel. Foi inserida uma função que permitiu selecionar na interface do *Revit* o elemento modelado para ser importado (*Graphical Element*). O *output* dessa função foi direcionado ao ponto de *input* de outra função (*Get Geometry*), que foi responsável por filtrar e direcionar apenas a geometria para a função *GHPython* (*GHPython*). Essa função *GHPython* permite experimentar a criação de condicionantes através da linguagem *Python* (Fig. 67).

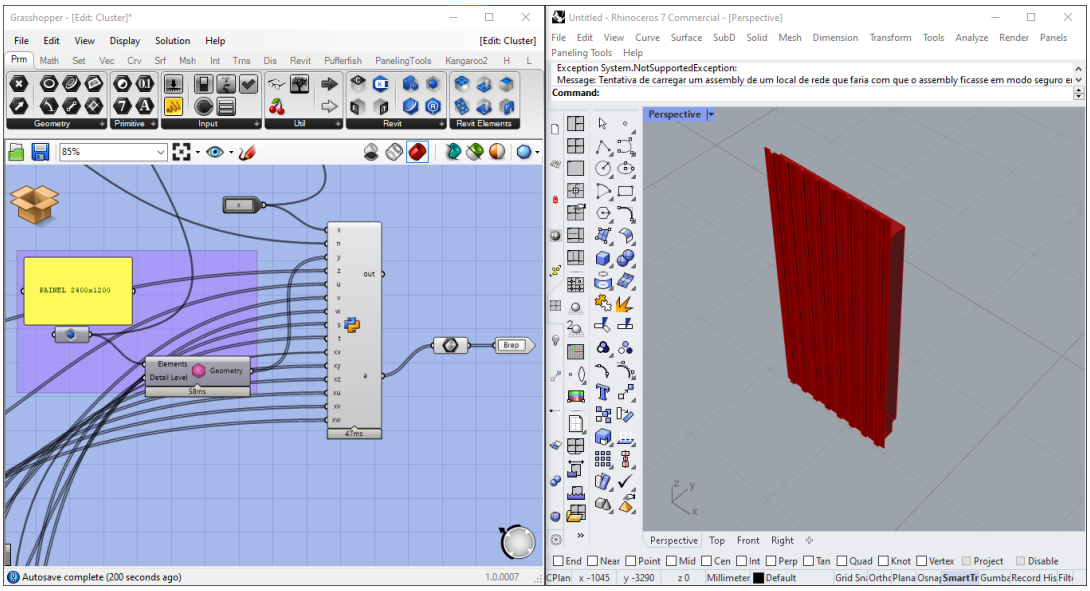


Fig. 67: Cadeia para importação e painel e visualização de painel opaco.

Cabe destacar que a função *GHPython* tem como um de seus principais atributos a possibilidade de realização de uma filtragem interna, pode receber informações gráficas de vários elementos ao mesmo tempo e ter como *output* apenas aquele que corresponda às condicionantes escritas em seu código. Dessa maneira, foi escrito na função *GHPython* um código que permitiria a saída de informações que fossem correspondentes com a informação estipulada em uma chave seletora. Foi então possível fazer uma cadeia de funções que, através da seleção de uma informação (nome de painel) na chave seletora, tivesse como resultado final a geometria que fosse correspondente à informação inicial (painel correspondente ao nome selecionado na chave) (Fig. 68).

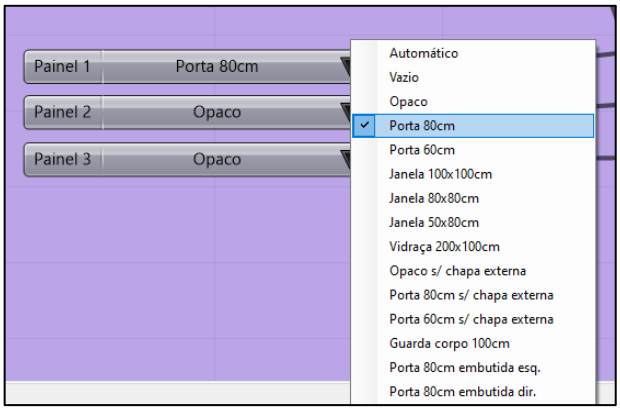


Fig. 68: Chaves seletoras do primeiro grupo e possibilidades de escolha de uma das chaves seletoras.

Posteriormente, uma segunda experiência foi feita com os elementos sendo importados no *Grasshopper* da mesma maneira como foram montados anteriormente no *Revit* (Fig. 69). Dessa forma, foi possível tirar notas sobre como seria a montagem de um módulo completo dentro do *Grasshopper*.

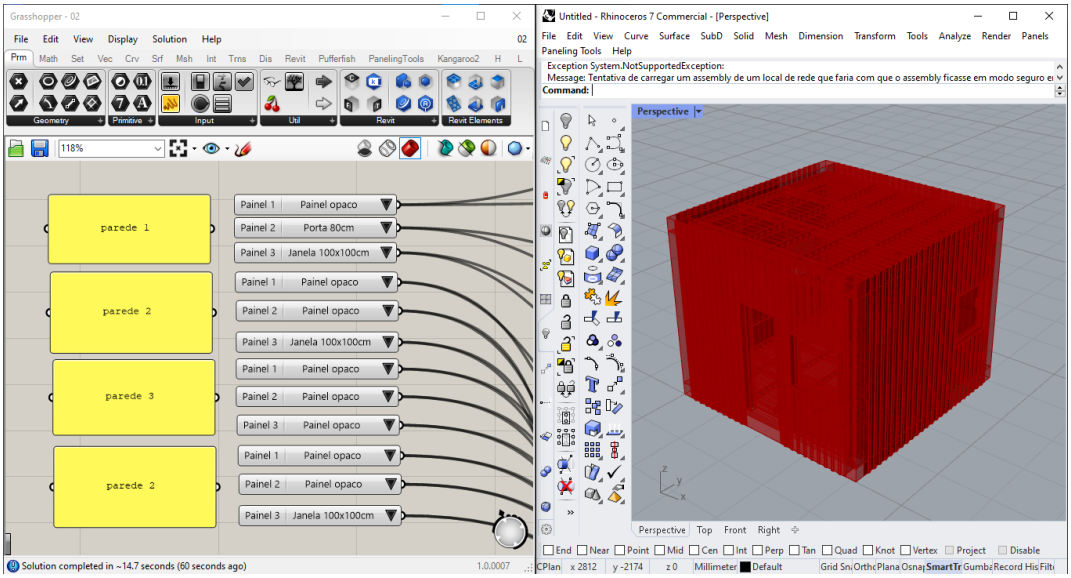


Fig. 69: Chaves seletoras das quatro paredes de um módulo (contém três painéis em cada parede) e visualização do resultado.

Como o objetivo do trabalho não foi somente a criação de um módulo único, em um segundo momento foi necessária uma reflexão sobre como trabalhar composições com mais módulos anexados. Dessa maneira, a estratégia tomada foi a criação de um grande tabuleiro modular dispondo de várias quadrículas de 3M x 3M (Fig. 70 e 71). Posteriormente o Núcleo-base foi importado em uma dessas quadrículas (Fig. 72), o que facilitaria a inserção dos módulos adjacentes para criar distintas tipologias

e variações dentro das tipologias. Essa última tarefa de inserção de elementos, portanto, foi o passo anterior para a criação do Modelo Paramétrico.

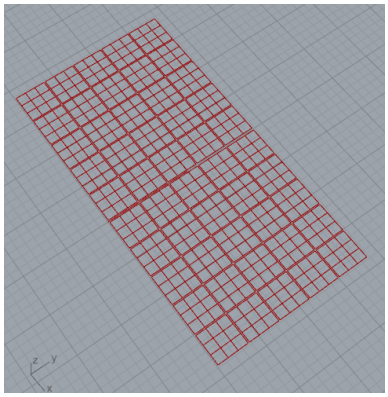


Fig. 70: Perspectiva do tabuleiro modular contendo 5 x 10 quadrículas, de 3M x 3M cada.

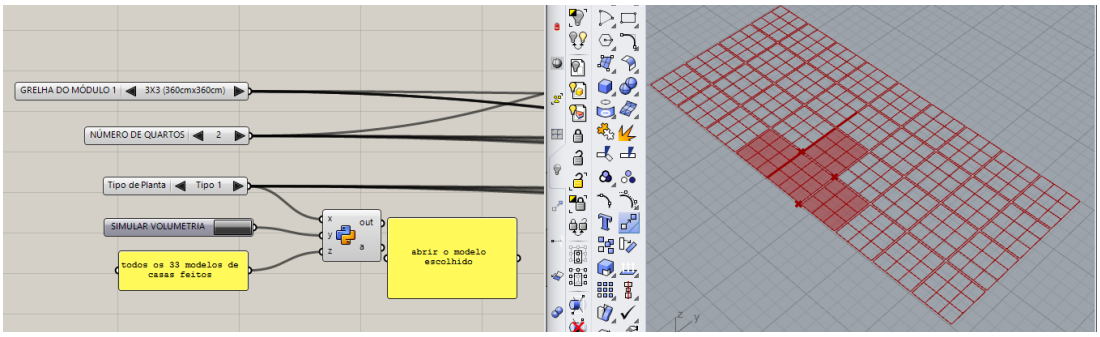


Fig. 71: Simulação de uma planta de tipologia T2 (núcleo-base + 2 quartos).

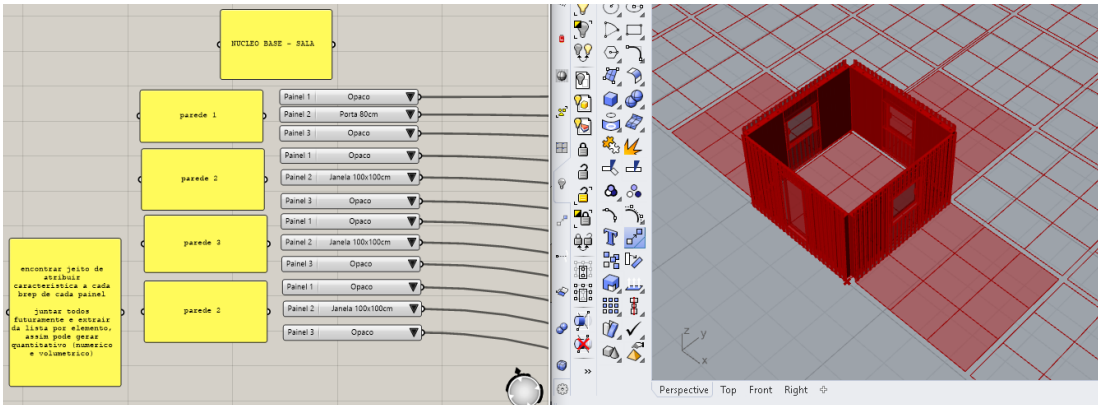


Fig. 72: Inserção de componentes na simulação de uma planta de tipologia T2 (núcleo-base + 2 quartos).

3.6.6 Criação do Modelo Paramétrico

- Evoluções, desenhos de planta e volumetria básica

Através do tabuleiro modular criado foi dado o primeiro passo na a criação do Modelo Paramétrico. A priori, a fim de se perceber como ocorreriam as evoluções e criar condicionantes para a geração

automática de painéis e telhados, foi necessário definir regras para serem projetadas todas as plantas dentro das quatro tipologias.

Percebe-se que na Lista de Regras de composição houve o apontamento de que a planta deveria evoluir linearmente, como o modelo da *Njordrum* (Fig. 73) que evolui ao longo do eixo de seu corredor central.

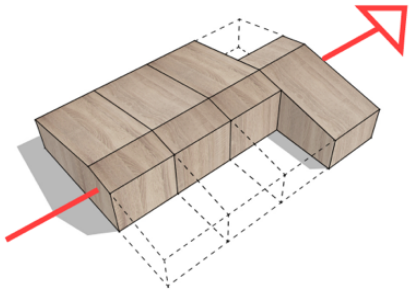


Fig. 73: Habitação da *Njordrum* com 4 módulos e eixo de evolução assinalado.

No entanto, após as primeiras experimentações, observou que esse modelo geraria uma quantidade limitada de plantas, além de que essas plantas teriam o espaço interno reduzido para a criação de corredores. Foi definido, portanto, que deveria ser incorporado no Modelo Paramétrico soluções que visassem gerar o maior espaço interno possível. Dessa maneira, foi definido que em todas as plantas os módulos adjacentes deveriam dividir uma parede com o Núcleo-base, sendo que nessa parede haveria uma porta para cruzar os módulos. Posteriormente foi definido que o Módulo Sala deveria ocupar a posição central inferior do quadrante, é que o Módulo Hidráulico deveria ocupar o quadrante acima ou o quadrante dos lados (devido ao facto desses módulos dividirem uma parede. Com essas definições foi possível dividir as plantas em dois grupos.

Grupo 1: em que o Módulo Sala ocupa o quadrante central da última linha do tabuleiro modular e o Módulo Hidráulico ocupa o quadrante logo acima. Plantas com essa estrutura teriam possibilidade de receber módulos de quarto na segunda, terceira e quarta linhas (Fig. 74).

Grupo 2: em que o Módulo Sala ocupa uma posição central na última linha e o Módulo Hidráulico pode ser em um quadrante antes ou depois do Módulo Sala. Dessa maneira, as evoluções das plantas com essa estrutura aconteceriam na última e penúltima linha do tabuleiro (Fig. 75).

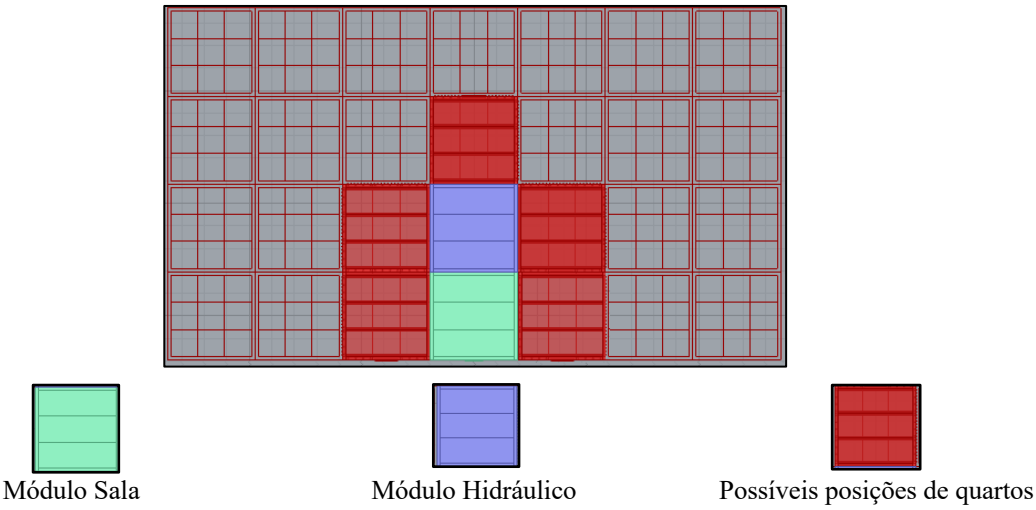


Fig. 74: Esquema de evolução de plantas do Grupo 1, com Núcleo-base e possíveis posições dos quartos.

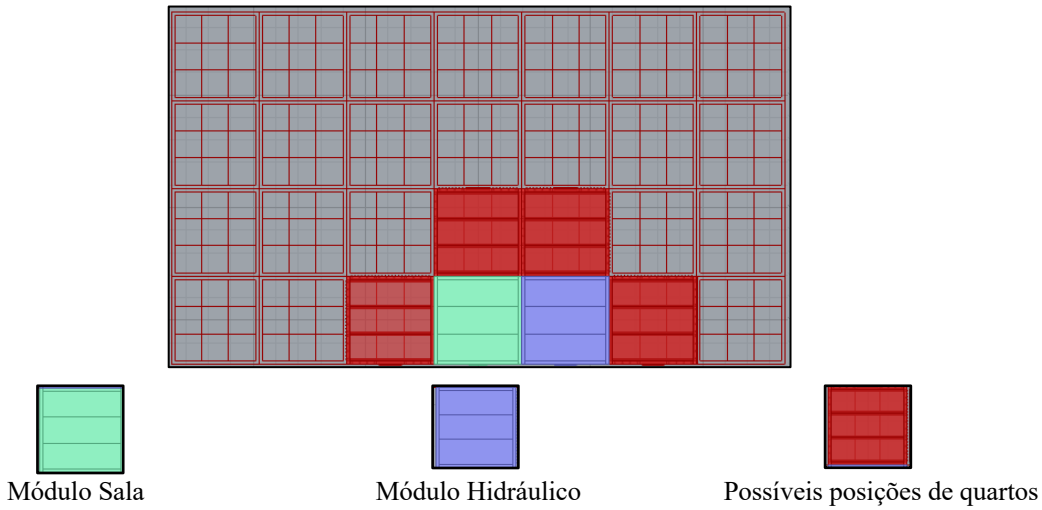
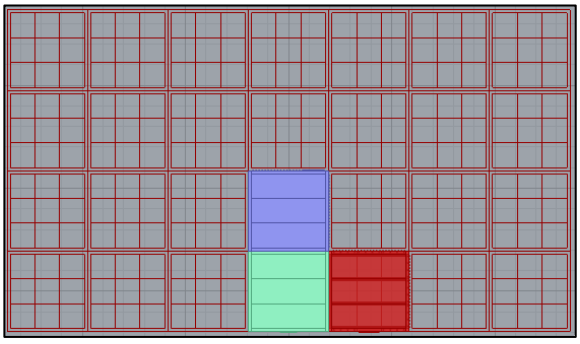


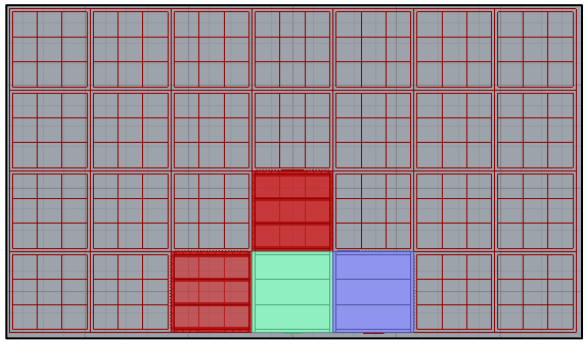
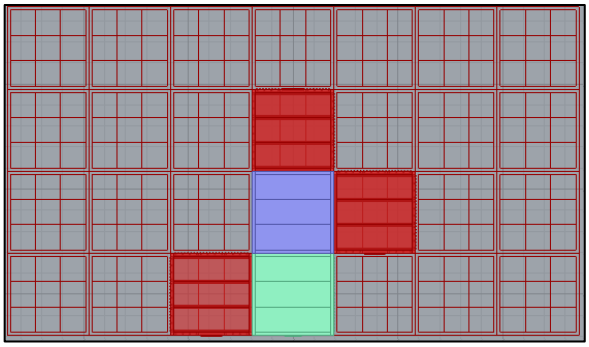
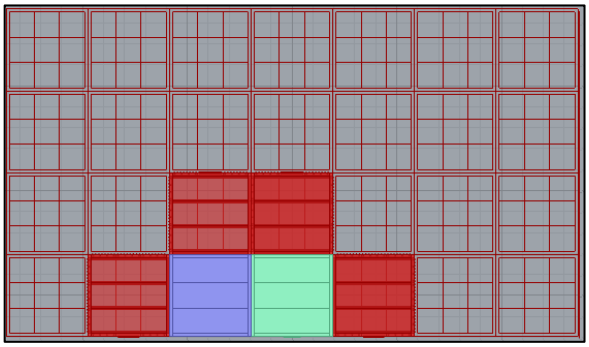
Fig. 75: Esquema de evolução de plantas do Grupo 2, com núcleo base e possíveis posições dos quartos.

Ao ser definido a posição do Módulo Sala, as possíveis posições do Módulo Hidráulico e o facto de que os módulos dos quartos adicionais sempre deveriam dividir uma parede com o Núcleo-base, puderam ser desenhadas todas as possibilidades de desenhos de planta dentro desse contexto. Respeitando as condicionantes, foram projetadas e contabilizadas 42 plantas, essas que se encontram em documento anexo (ANEXO III). Separadas por tipologia, as plantas correspondem a:

- 10 variantes de plantas de tipologia T1;
- 13 variantes de plantas de tipologia T2;
- 12 variantes de plantas de tipologia T3;
- 7 variantes de plantas de tipologia T4.

Tab. 19: Exemplo de quatro plantas diferentes que foram geradas.

Legenda	 Módulo Sala	 Módulo Hidráulico	 Quartos
Tipologia T1 - Número 5			

Tipologia T2 – Número 6	
Tipologia T3 – Número 11	
Tipologia T4 – Número 6	

Após realizar o ensaio e a definição das plantas possíveis, chegou-se à conclusão de que o tabuleiro modular poderia conter apenas 4 linhas e 7 colunas (Fig. 76). Isso deve-se ao facto de que as plantas jamais ultrapassariam a segunda coluna ao lado da coluna central nas plantas do Grupo 2 (o Núcleo-base sempre ocupa a linha central e a linha do lado) e ao facto de que as plantas jamais ocupariam a segunda linha nas plantas do Grupo 1 (o Núcleo-base sempre ocupa a última e penúltima linhas). Calcula-se, portanto, que 3 linhas por 5 colunas seriam o suficiente contudo foi deixada mais uma coluna e uma linha como uma espécie de "respiro", para caso surgisse em algum momento a necessidade de ampliar alguma tipologia. Ademais, cabe mencionar que cada um dos quadrantes do tabuleiro de 4 linhas por 7 colunas ganhou uma referência de posição, essa que varia de P1 a P28. Vislumbrou-se que essa estratégia ajudaria a desenhar plantas de acordo com a combinação de posições.

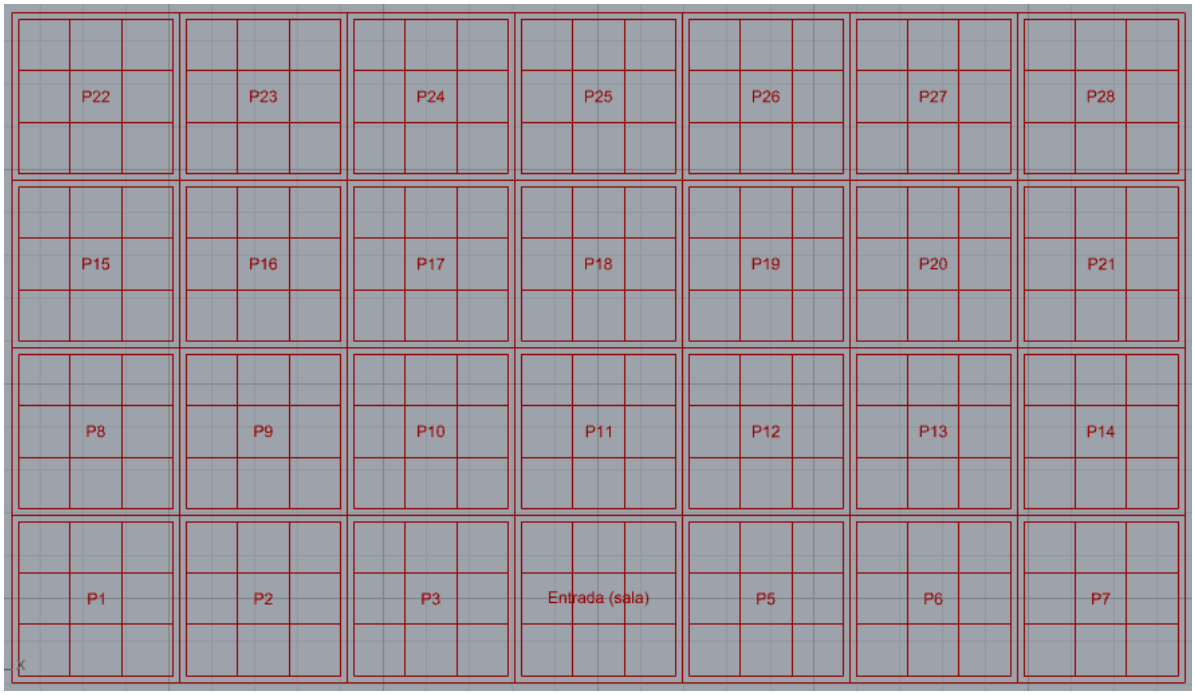


Fig. 76: Tabuleiro com quadrantes de posições que vão do P1 (posição 1) ao P28 (posição 28). Observação.: a quadrícula Entrada (sala) corresponde à posição P4 (posição 4).

Diante dos pontos estabelecidos, foi realizado um terceiro experimento, a modelagem de uma habitação. A priori, essa habitação não conteria planta e painéis automaticamente gerados (os elementos apenas foram agregados em módulos para conformar a habitação de número 7 da tipologia T4). O objetivo foi ganhar mais conhecimento sobre o processo e as ferramentas do *Grasshopper* (Fig. 77).

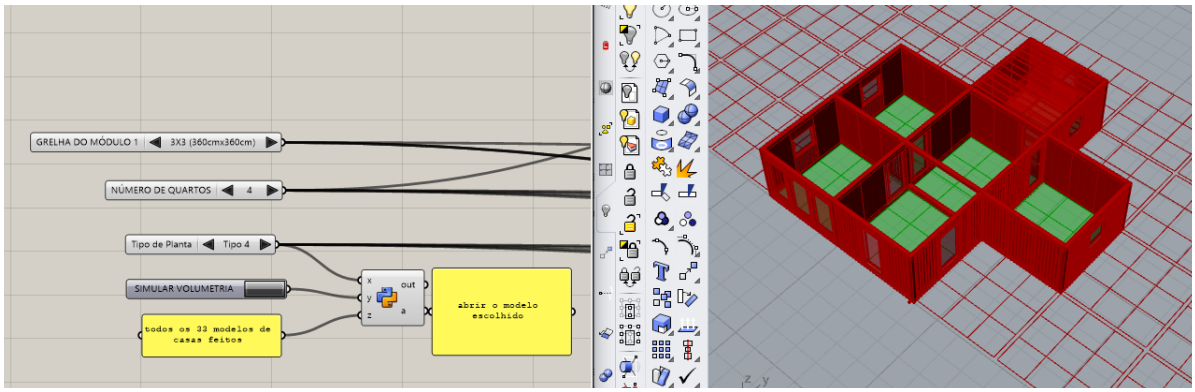


Fig. 77: Codificação inicial e representação de casa e tipologia T4.

Em um momento posterior a simulação evoluiu com a inserção das lajes de piso e lajes de cobertura, além da separação dos conteúdos de cada um dos seis módulos (Fig. 78). Esperou-se que essa organização dos elementos poderia auxiliar no prosseguimento futuro, quando condicionantes seriam inseridas a fim de se criar um Modelo automatizado.

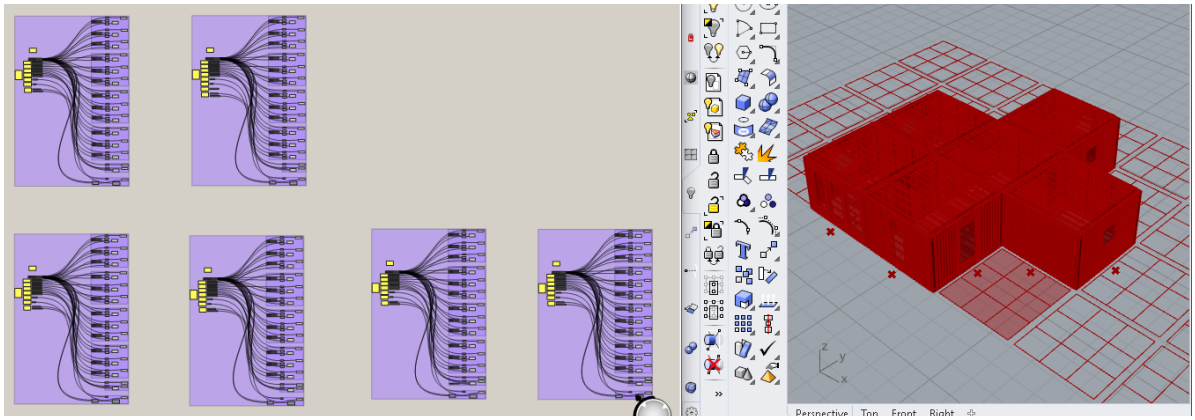


Fig. 78: Simulação de habitação T4 e respetivos códigos de cada um dos módulos.

- ATUALIZAÇÃO DO GERADOR

Para que modo de geração de habitações se alinhe totalmente a um dos preceitos da construção evolutiva, nomeadamente o processo de adição de compartimentos a uma construção existente, foi necessário fazer uma atualização. Foram aplicadas novas regras ao gerador de habitação para que se tornasse mais alinhado a essa ideia, de forma que os projetos pudessem ser aumentados módulo por módulo.

Inicialmente foi criado um painel com 4 chaves seletoras que representam a posição de 4 possíveis quartos a serem anexados ao Núcleo-base (Fig. 79). Importante de se ressaltar que nesse esquema foi necessário "travar" as posições do Núcleo-base para que a edificação pudesse evoluir ao seu redor, o que levou a defini-lo nas posições P4 e P11. Dessa maneira, os quartos adjacentes poderiam ocupar as posições P3, P5, P10 e P18, o que quer dizer que através desse novo gerador poderiam ser produzidas plantas com desenho similar das plantas do Grupo 1, que totaliza 30 possiblidades.

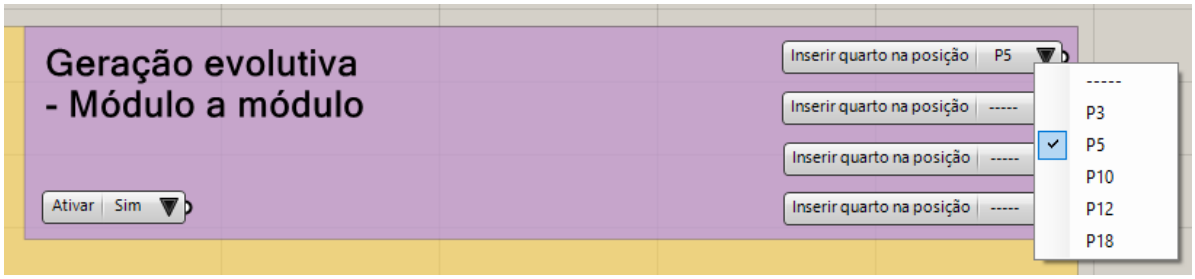


Fig. 79: Chaves seletoras de gerador de habitação por evolução.

As chaves seletoras de posições foram direcionadas para uma cadeia de funções própria. A priori, uma função *GHPython* ficou responsável por eliminar duplicidade de posições, evitando se assim erros por parte de usuários que colocassem duas posições idênticas nas chaves seletoras. As funções *Clean Tree*, *Sort List* e *Split List* foram definidas para reorganizar os dados: eliminam valores nulos, organizam a lista de posições em ordem crescente e decompõem a lista. Uma função *GHPython* foi criada para converter as combinações das posições dos módulos para qual tipologia e a variante que correspondem, utilizando da mesma codificação que faz parte do primeiro gerador de habitações (Fig. 80). Tal estratégia tomada devido ao facto de que a estrutura das cadeias do Modelo Paramétrico após a definição da tipologia e desenho de planta ainda seria a mesma.

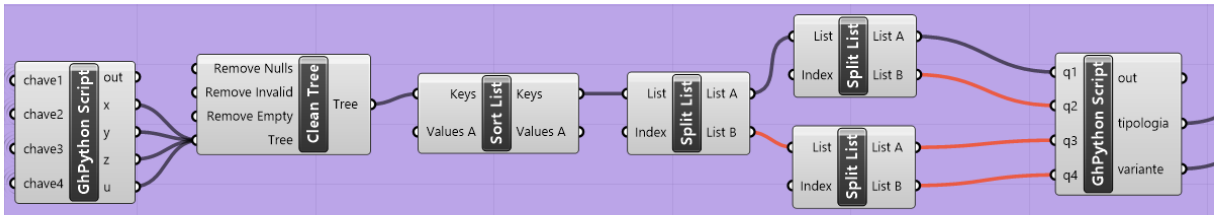


Fig. 80: Cadeia de funções do gerador.

Cabe destacar que o gerador antigo foi mantido à parte no Modelo Paramétrico como uma ferramenta secundária, para que não houvesse exclusão da possibilidade de gerar as plantas do Grupo 2. Para que isso fosse possível, foi criada uma última função *GHPython*, essa destinada a definir qual dos dois geradores de habitações cederia as informações para o Modelo computar (Fig. 81). Através de duas chaves seletoras dispostas nas proximidades de cada um dos geradores, se define qual desses está ativado através das opções "ativar e desativar". Desse modo, as informações seriam direcionadas para serem processadas pelo restante do mecanismo do Modelo Paramétrico.

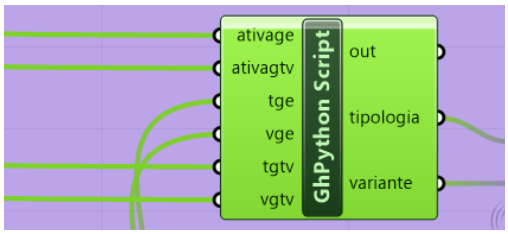


Fig. 81: Função *GHPython* que filtra a tipologia e a variante da planta de acordo com a ativação de seu gerador.

- SIMULAÇÃO DE VOLUMETRIAS

Foi realizada outra experimentação a fim de colocar em prática o que foi anteriormente definido e a fim de vislumbrar como seria a composição de cadeias de funções que gerariam habitações automaticamente. Para isso, foi desenhada a volumetria de um módulo no *software Revit*, sem detalhamentos (Fig. 82).

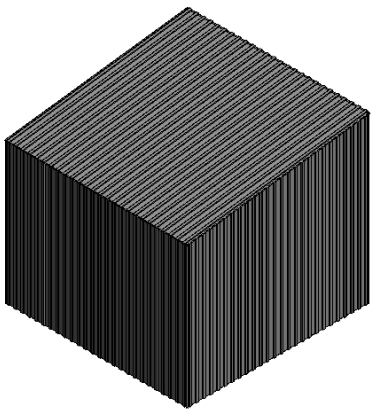


Fig. 82: Modelo de bloco.

Esse volume foi importado no *Grasshopper*. Ao passo que já haviam sido criadas todas as variações de planta possíveis a partir das condicionantes relativas às posições do Núcleo-base e quartos, em todas as posições de módulo das 42 plantas foram posicionados módulos, de forma que fosse possível ver a volumetria dessas 42 habitações. Para a realização dessa tarefa, foram aplicados nos módulos comandos

de cópia, movimentação e rotação. Posteriormente todas as 42 plantas foram associadas ao seu respetivo número de quartos e ao seu número respetivo em uma função *GHPython*.

O Modelo mostrou-se eficiente e com plenas capacidades de simulação volumétrica a partir do número de quartos e o número da planta, visto que ao passo que a função foi configurada para receber esses dados elementares como *inputs*, ela tinha como *output* a volumetria da edificação correspondente (Fig. 83 e 84). Essa experimentação gerou conhecimento para a execução do Modelo Paramétrico, que viria a ser de maior complexidade visto que envolveria não apenas volumes sólidos, mas uma composição de todos os elementos correntes de uma construção pré-fabricada.

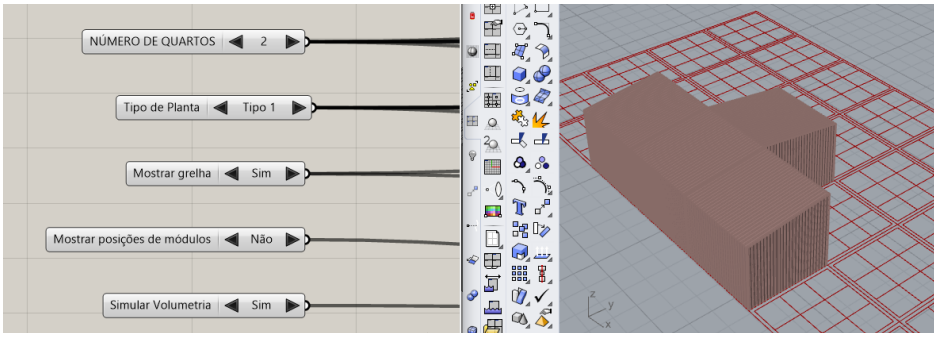


Fig. 83: Importação do bloco no *Grasshopper* e visualização do *Rhinoceros* de habitação de tipologia T2.

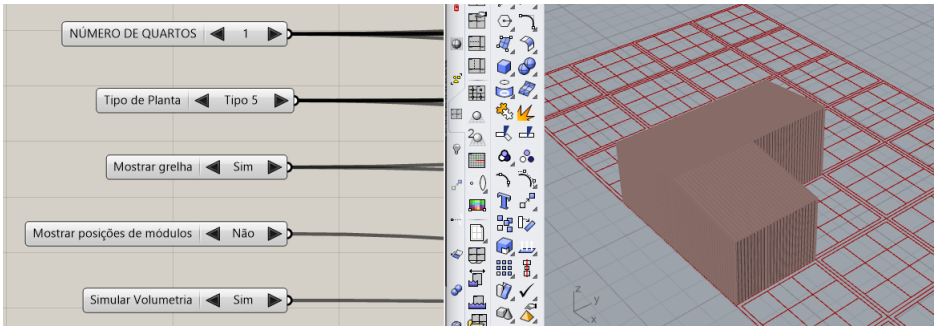


Fig. 84: Importação do bloco no *Grasshopper* e visualização do *Rhinoceros* de habitação de tipologia T1.

- CÓDIGOS DE REFERÊNCIAS DE MÓDULOS

Para avançar na construção do Modelo Paramétrico, percebeu-se que seria necessário criar códigos de referências para cada um dos módulos. Definiu-se que o Módulo Sala receberia o código "NS", o Módulo Hidráulico receberia o código "NM" e os Quartos 1, 2, 3 e 4 receberiam respetivamente os códigos "Q1", "Q2", "Q3" e "Q4".

Conforme exposto anteriormente, os Módulos Sala (Fig. 85) e Módulo Hidráulico (Fig. 86) sempre devem dividir uma parede, visto que esses módulos se conectam e conformam um conceito *open space*. Os Quartos 1, 2, 3 e 4 (Fig. 87) são genéricos, isto é, não tem particularidades e só possuem diferenciação no nome por uma mera questão de organização espacial.

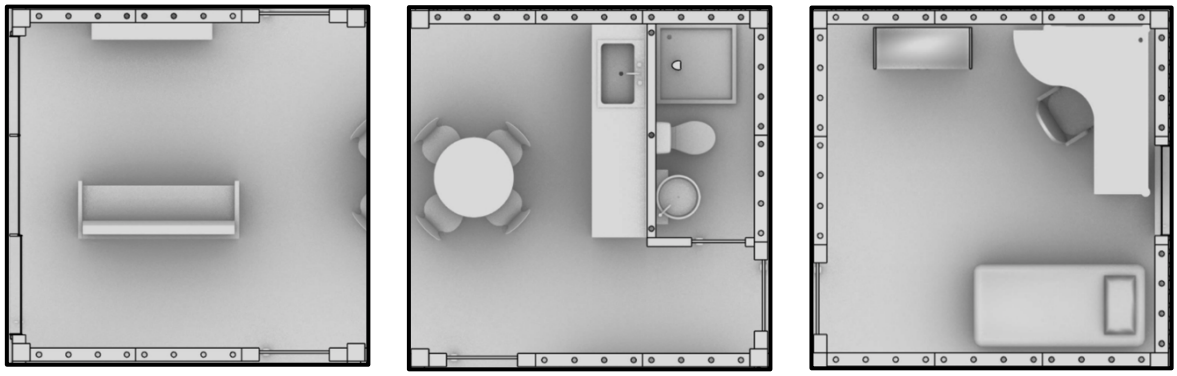


Fig. 85, 86 e 87: Módulo Sala (NS), Módulo Hidráulico (NM) e Módulo Quarto genérico (Q1, Q2, Q3 e Q4).

Atribuir códigos aos quadrantes do tabuleiro e aos módulos permitiu que duas correlações fossem feitas:

i. Como cada quadrante do tabuleiro tem um código que varia de "P1" a "P28", é "montar" plantas a partir da combinação desses códigos (por exemplo, uma habitação T1 pode ser montada a partir da combinação de "P3", "P4" e "P5");

ii. Como os módulos passaram a ter abreviaturas, os módulos Módulo Sala, Módulo Hidráulico e Quartos puderam ser relacionados aos códigos dos quadrantes de tabuleiro.

Ao passo que as 42 plantas podem ser identificadas a partir de sua tipologia e seu respetivo número de referência dentro de sua tipologia, toda a lógica permitiu que os dados introduzidos pelo usuário (números de quartos e número da planta) pudessem ser direcionados para um código de função *GHPython*. Posteriormente, através de condicionantes estipuladas no código, essa função conseguiria entregar como *output* a planta, essa é configurada nessa função através da relação entre códigos de tabuleiro e códigos de planta. No exemplo da Figura 88, o código recebe a tipologia/número de quartos (4) e a referência da planta dentro dessa tipologia. Foi escrito dentro dessa função um código que relaciona os módulos às seguintes posições: Módulo Sala/NS = "P4", Módulo Hidráulico/NM = "P11", Quartos/Q1/Q2/Q3/Q4 = "P3"/"P5"/"P10"/"18".

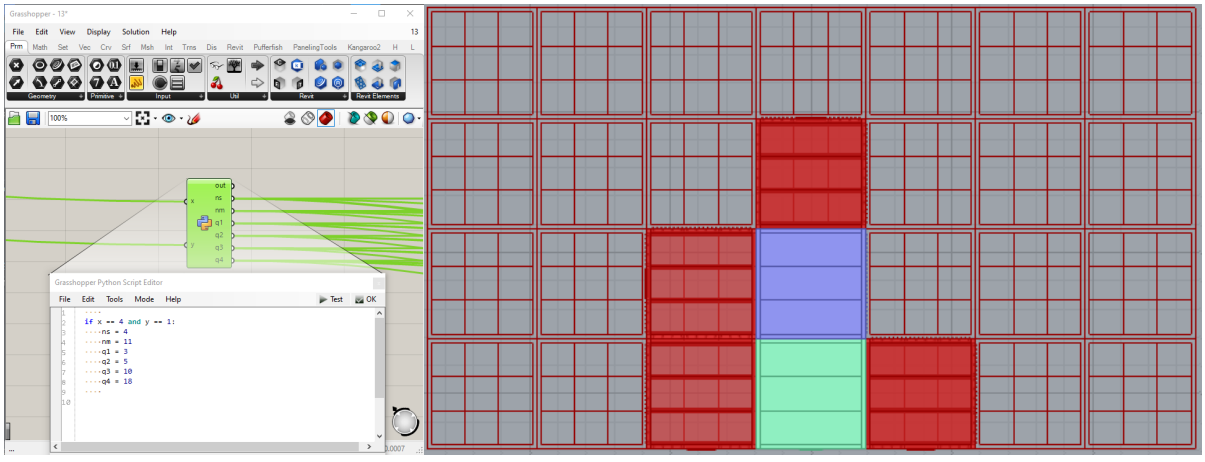


Fig. 88: *Plugin GHPython* do *Grasshopper* e planta de tipologia T4 (número 1).

Em termos gerais, essa função *GHPython* realiza a projeção das plantas (que já haviam sido pensadas e definidas anteriormente de acordo com condicionantes) nos quadrantes do tabuleiro. Como essa função permite a "fixação" das plantas no tabuleiro modular e como já se sabe como inserir um módulo padrão

em uma posição específica no tabuleiro modular, as habitações puderam ser configuradas, restando a tarefa de fazer com que os painéis de parede e os elementos de cobertura sejam definidos automaticamente de acordo com a função de cada módulo na planta.

- CODIFICAÇÃO DE PAREDES E PAINÉIS

Ao passo que módulos passaram a ser projetados no tabuleiro de acordo com cada planta, ainda havia dificuldade de se estabelecer a fórmula ideal para a composição das paredes. Era notório que era necessário pensar nas configurações de paredes para cada uma das situações abaixo:

- Quando a parede deve ser externa e 100% opaca;
- Quando a parede deve ser externa e com janela;
- Quando a parede deve ser externa e com porta;
- Quando a parede deve ser interna e opaca;
- Quando a parede deve ser interna e com abertura para circulação horizontal;
- Quando a parede interna não deve existir.

Para responder essas situações, foi necessário codificar a composição das paredes. Ao passo que cada uma das paredes tem três painéis, todos os painéis dos módulos receberam códigos (que variam do p1p1 ao p4p3), esses que foram atribuídos a partir do canto inferior esquerdo e avançaram no sentido anti-horário (Fig. 89).

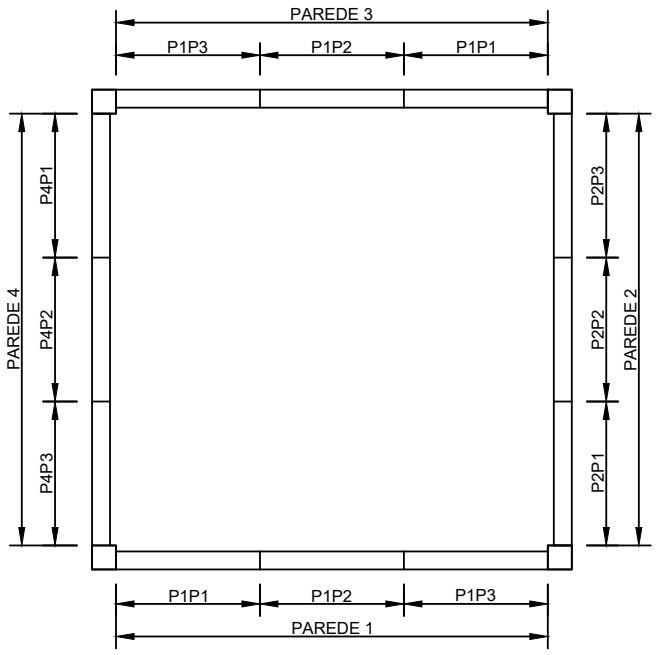


Fig. 89: Esquema da atribuição de códigos aos painéis.

Desse modo, foi possível criar combinações de parede, relacionando os códigos dos painéis (elementos) ao código de posição na parede. Como exemplo, se na parede 1 houvesse uma janela entre dois painéis opacos, a relação seria:

- p1p1 = painel opaco exterior;
- p1p2 = painel de janela;
- p1p3 = painel opaco exterior.

Toda essa composição, portanto, fez com que paredes pudessem ser codificadas a partir das condições de encontro de cada módulo com outro (ou não). Diante isso, somente restou a interpretação das situações possíveis e elaboração de um código em uma função *GHython* que analisou a posição do módulo de interesse, analisou se haveria módulos limítrofes (expressões matemáticas que adicionava ou subtraía "1" do código de referência do módulo para descobrir se outro módulo estava logo ao lado) (Fig. 90 e 91). O *output* desse código foi a combinação dos 12 painéis do módulo.

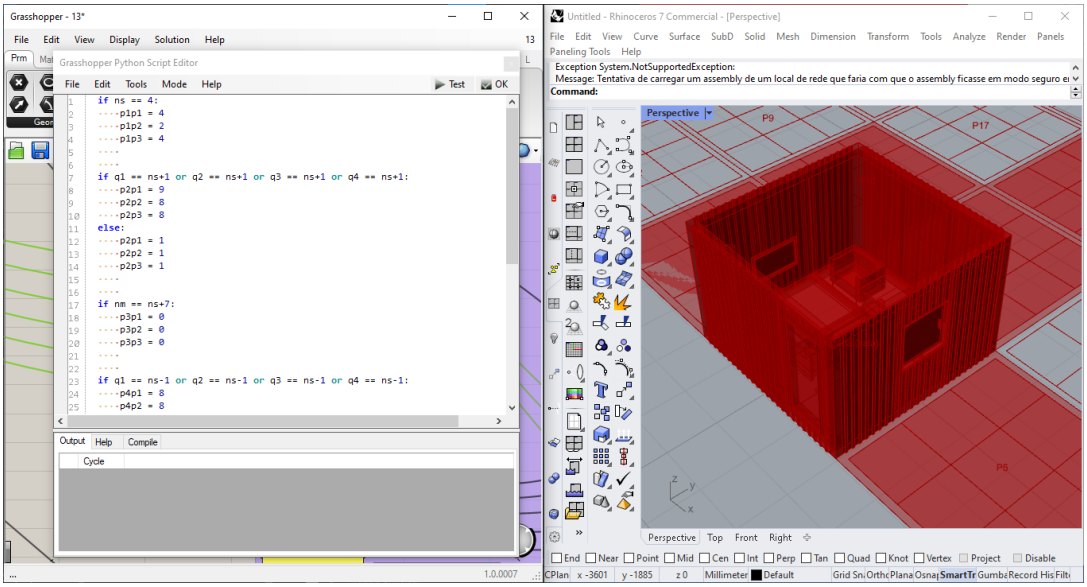


Fig. 90: Desenvolvimento dos painéis do módulo sala do núcleo base.

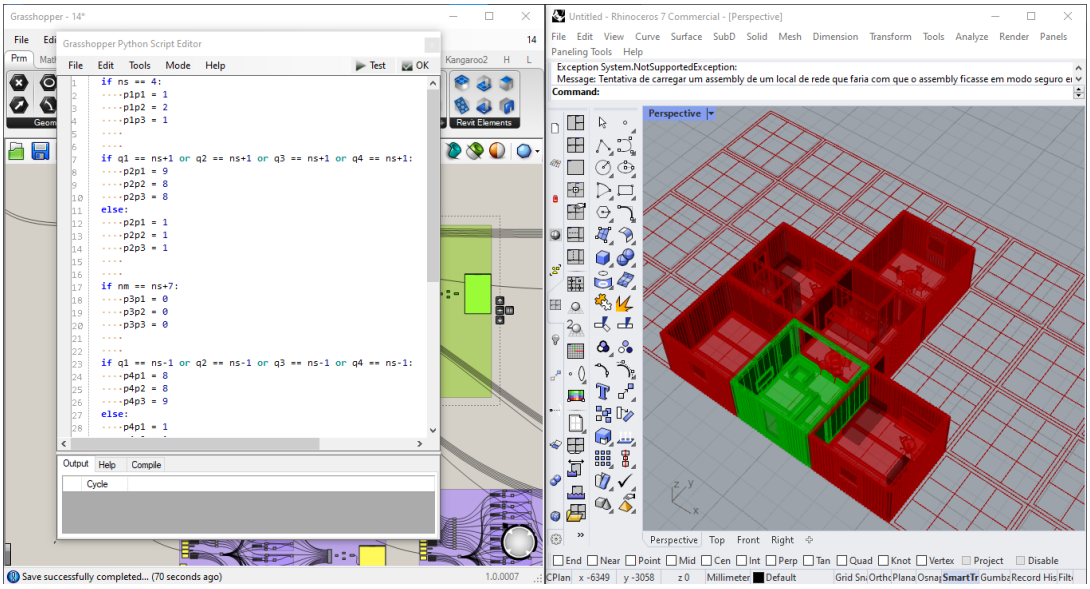


Fig. 91: Combinações de painéis de acordo com a presença de módulos e planta formada.

- *DECK*

A configuração do *deck* seguiu uma lógica similar à lógica dos módulos, exatamente no que se diz respeito à forma de importar, copiar e movimentar os elementos geométricos. Não houve necessidade de configurações complexas, tendo-se em vista que o bloco de componentes referente a um *deck* sempre seria o mesmo, diferentemente da composição dos módulos, que são bastante dinâmicos. Foi estipulado

que o *deck* não estaria preso às posições P1 a P28, mas que seria um *deck* frontal: ou seja, evoluiria ao longo da fachada, ocupando o espaço defronte das posições P1 a P7 (Fig. 92). Ademais, foi estipulado que a escada automaticamente seria disposta na frente do painel 2 da parede 1 do Módulo Sala em qualquer habitação gerada, podendo de acordo com o usuário, ser posteriormente também colocada na frente dos painéis 1 e 3 desse mesmo módulo. Ao passo que o *deck* fosse introduzido, a escada automaticamente seria movimentada para a frente do *deck*.

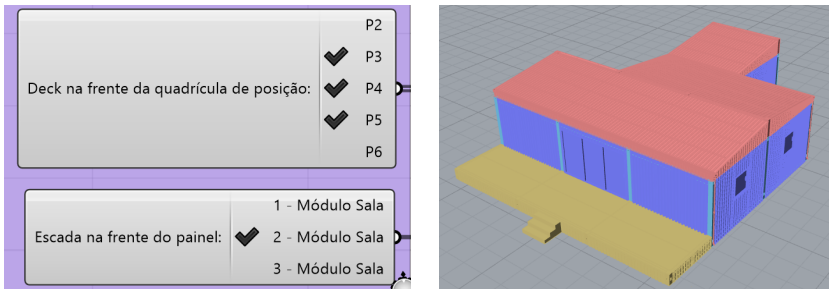


Fig. 92: Chaves seletoras para posicionamento do *deck* e da escada.

- TELHADOS

A priori, foi necessário estabelecer condicionantes para a definição do sentido das quedas de água e consequentemente realizar o desenho das coberturas das edificações. Dessa maneira, foi definido por defeito em todas as plantas que a cumeeira das coberturas se situasse no eixo das linhas, exatamente entre as linhas 3 e 4 dos módulos (Fig. 93).

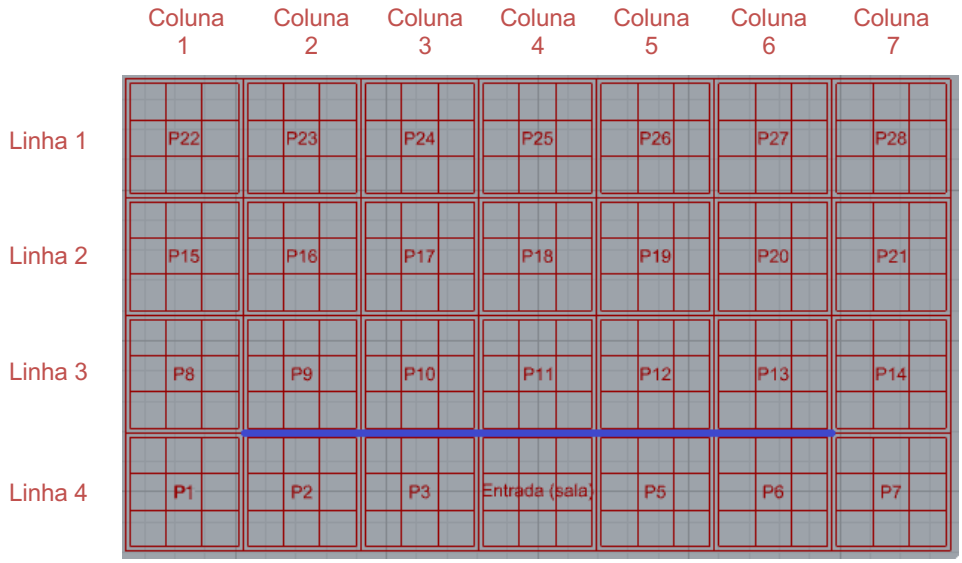


Fig. 93: Demarcação em azul do alinhamento da cumeeira por defeito.

Em apenas duas situações foi necessário mudar o sentido da cumeeira: quando os módulos da habitação ocupavam as linhas 2, 3 e 4 e as colunas 3 e 4 (Fig. 94) ou as linhas 2, 3 e 4 e as colunas 4 e 5 (Fig. 95). Nessas situações excecionais, a cumeeira deveria estar no eixo das colunas, exatamente entre as colunas em que a habitação está inserida.

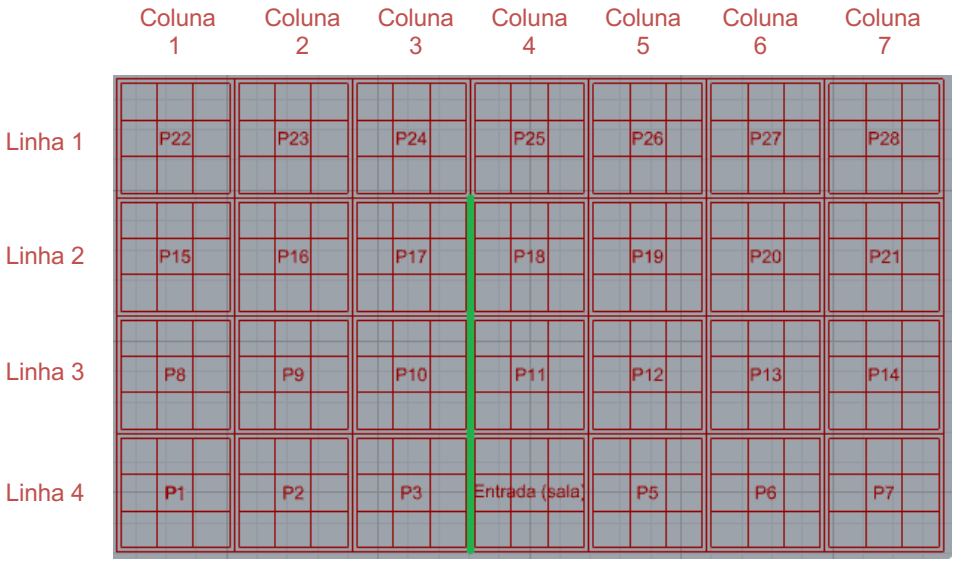


Fig. 94: Demarcação em verde do alinhamento da cumeeira em habitações cujos módulos ocupam as linhas 2, 3 e 4, e as colunas 3 e 4.

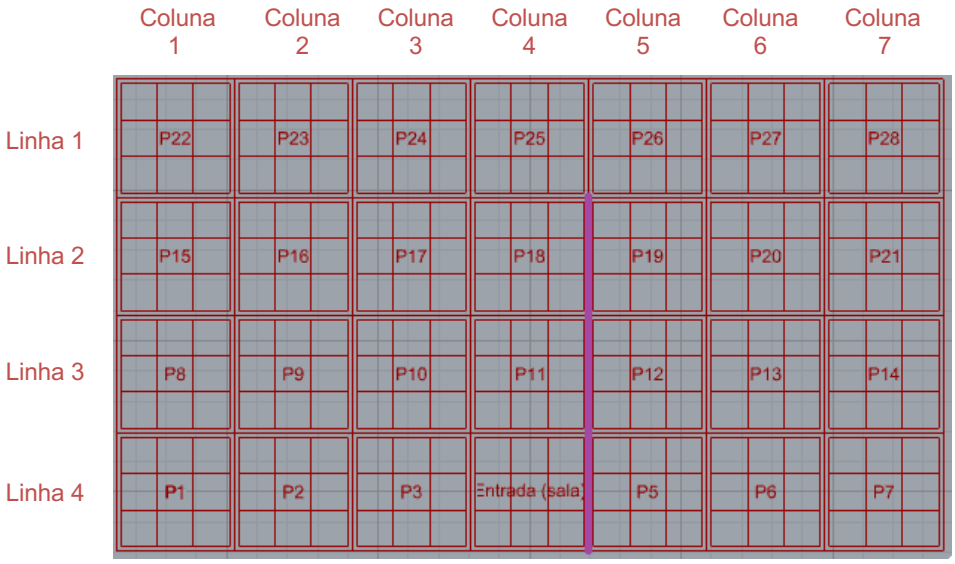


Fig. 95: Demarcação em rosa do alinhamento da cumeeira em habitações cujos módulos ocupam as linhas 2, 3 e 4 e as colunas 4 e 5.

Com esse entendimento, foi possível visualizar telhados completos que respeitariam o método corrente de construção de coberturas, seja no que diz respeito às melhores posições para a queda da água, seja no que se diz respeito ao realizar cumeeiras que sejam paralelas ao lado de maior dimensão de uma construção.

Posteriormente, os módulos foram importados através da lógica já utilizada para importação de elementos (*Graphical Element* e *Element Geometry*), transpostos às posições específicas utilizando as posições de referência de seus respetivos módulos no tabuleiro modular e rotacionados de acordo com o sentido de queda de água que respeita as condicionantes de cumeeira estabelecidas acima. Relativamente aos fechamentos laterais, a cadeia de funções de coberturas necessitou receber uma

função *GHPython*, que recebeu como *inputs* os elementos geométricos Fechamento esquerdo e Fechamento direito. De acordo com a necessidade de cada cobertura, a função foi escrita com o fechamento lateral esquerdo ou direito, nenhum fechamento, ou uma combinação dos dois fechamentos. As opções de fechamento, que se conformam através dos componentes presentes na Tabela 16 desta tese, foram codificadas na função:

- Fechamento esquerdo = “esq”;
- Fechamento direito = “dir”;
- Fechamento direito + esquerdo = “esqdir”;
- Nenhum fechamento = “Null”.

Para realizar a modelagem da cobertura de toda a edificação, portanto, foi necessário ter como *outputs* dessa função os elementos de fechamento das coberturas de cada um dos módulos. Foram atribuídos os códigos para as saídas:

- Fechamento lateral Módulo Sala = “flns”;
- Fechamento lateral Módulo Hidráulico = “flnh”;
- Fechamento lateral quarto 1 = “flq1”;
- Fechamento lateral quarto 2 = “flq2”;
- Fechamento lateral quarto 3 = “flq3”;
- Fechamento lateral quarto 4 = “flq4”.

Em um caso de exemplo, em habitação T1 em que o Módulo Sala ocupa a posição “P4”, o Módulo Hidráulico ocupa a posição “P11” e o quarto ocupa a posição “P5” (Fig. 96), a configuração deveria ser escrita na função *GHPython* da seguinte forma:

- “flns” = “esq”;
- “flnh” = “esqdir”;
- “flq1” = “dir”.

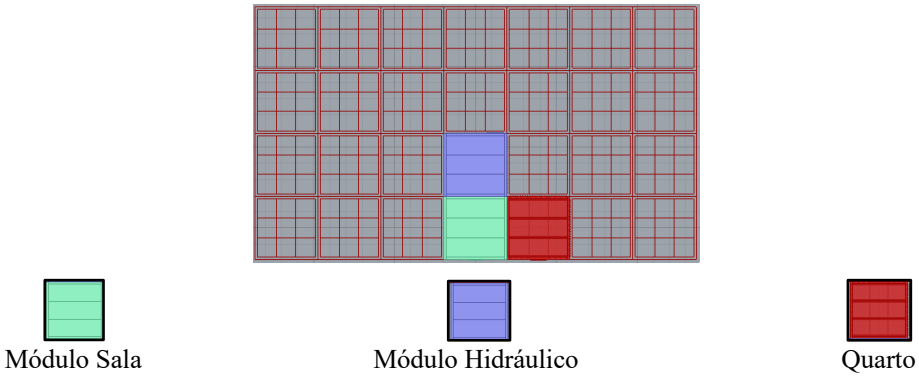


Fig. 96: Cadeia de fechamentos laterais de telhado no *Grasshopper*.

Como aprimoramento dessa ideia, se sugeriu que a modelagem das coberturas não fosse feita exatamente em função das posições dos módulos no tabuleiro modular, mas que a função GHPython as interpretasse e as submetesse a condicionantes específicas, identificando padrões e as relações dos módulos. Como exemplo, uma edificação específica em que “ns” é “P3”, “nm” é “P4” e “q1” é “P5”, poderia ser configurada como “ns” < “nm” < “q1”. Essa estratégia tende a dinamizar o processo, visto que unifica situações similares de conexão de módulos. Dessa forma, essas situações podem ser escritas somente uma vez, evitando assim a configuração dos telhados de todas as edificações (Fig. 97).

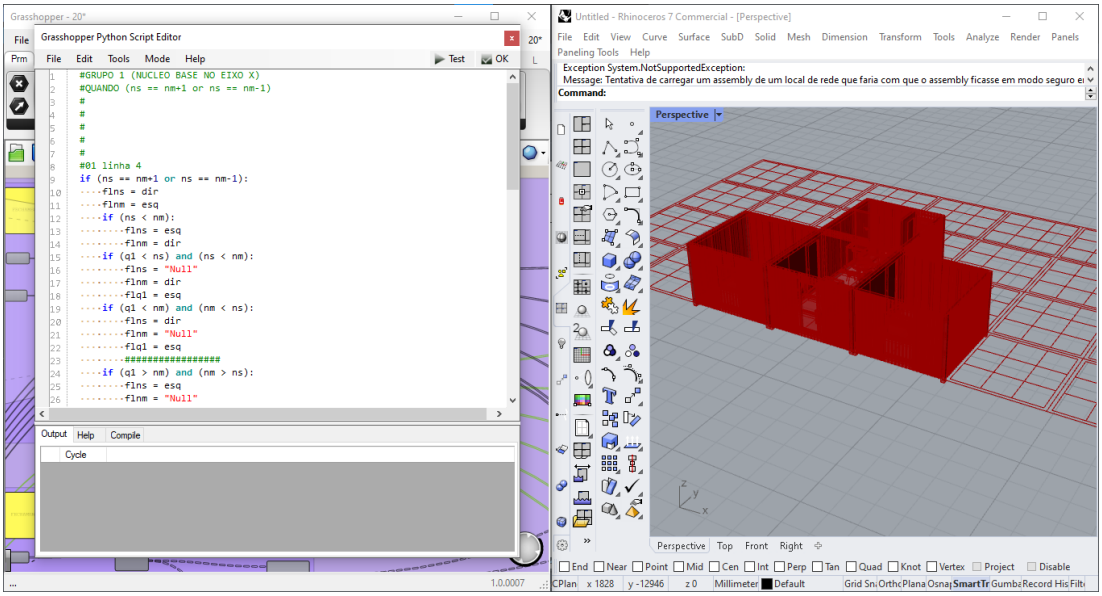


Fig. 97: Código da função *GHPython* para fechamentos laterais de telhado.

No que se diz respeito à modelagem dos fechamentos traseiros das coberturas, a mesma lógica criada para os fechamentos laterais foi aplicada (Fig. 98).

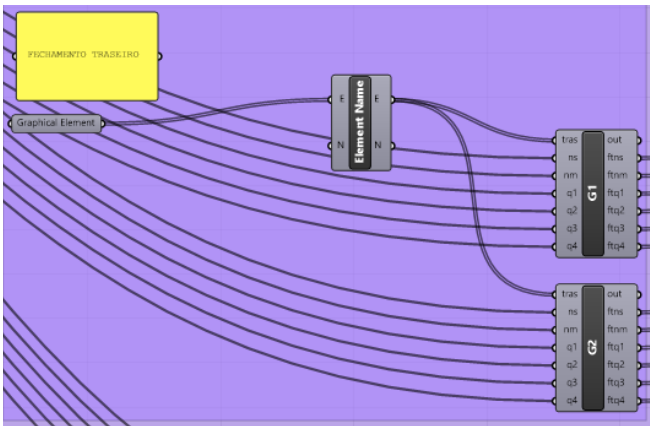


Fig. 98: Cadeia de fechamentos traseiros dos telhados das plantas do Grupo 1 e habitação T3 de número de planta 4.

Ao passo que todos os telhados puderam ser direcionados sobre os respetivos módulos, foi necessário trabalhar as condicionantes de rotação dos telhados, para que as águas pudessem ser direcionadas para o local correto. Desse modo, foi criada uma função *GHPython*, onde foram estipuladas quatro possíveis rotações para cada módulo (Fig. 99):

- Rotação de 0 graus, posição inicial e o beiral aponta para sul;
- Rotação de 90 graus, gira no sentido anti-horário e o beiral aponta para leste;
- Rotação de 180 graus, gira no sentido anti-horário e o beiral aponta para norte;
- Rotação de 270 graus, gira no sentido anti-horário e o beiral aponta para oeste.

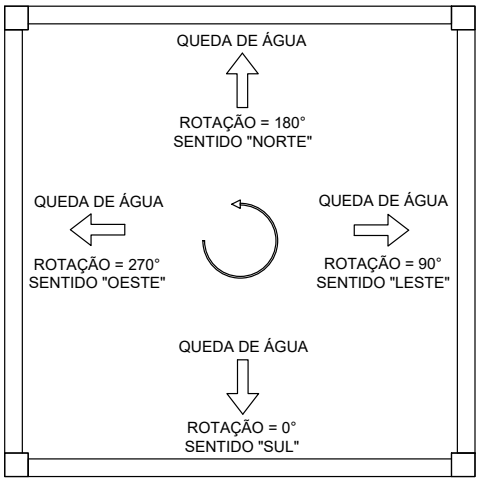


Fig. 99: Esquema da rotação do telhado.

Ao passo que a referência da posição dos módulos foi o *input* dessa função (Fig. 100), foi possível obter como *output* o valor da rotação em graus para cada um dos telhados dos módulos que integram qualquer planta.

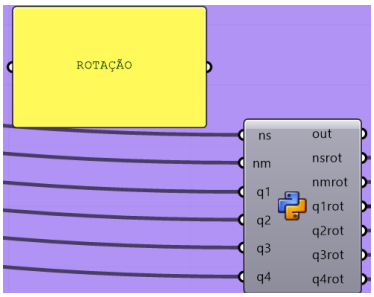


Fig. 100: Função *GHPython* para rotação dos telhados.

Todas as informações processadas relativas a telhados foram direcionadas para seis cadeias finais, cada uma representando um módulo. Notoriamente, somente são exibidas e processadas as cadeias que foram previamente selecionadas, em caso contrário a informação processada seria nula e não geraria nenhuma resposta.

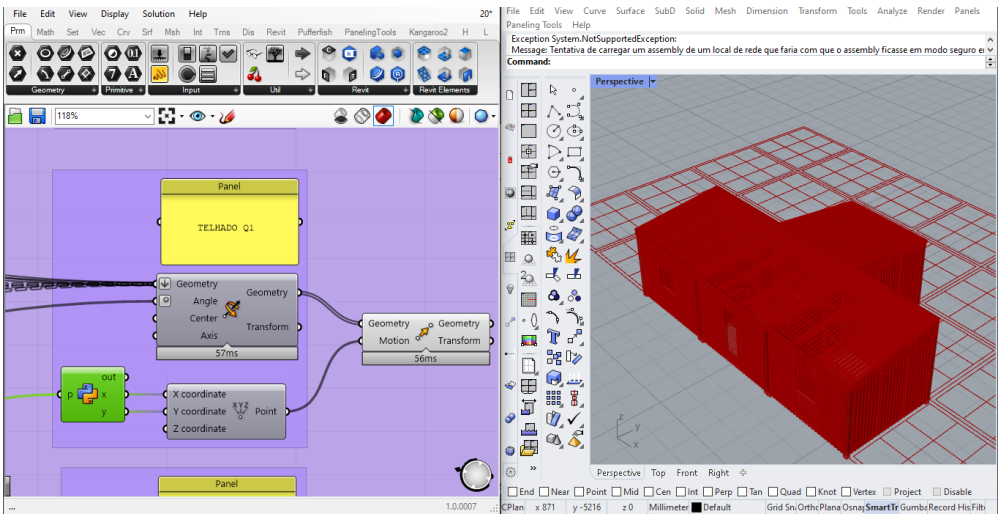


Fig. 101: Cadeia de fechamento lateral à esquerda e habitação de tipologia T2 à direita.

Assim sendo, foram finalizadas todas as cadeias e códigos *GHPython* referentes aos telhados, obtendo-se assim a seção do Modelo Paramétrico responsável por atribuir as coberturas às habitações.

- LISTAS DE QUANTITATIVOS

Como trabalho final, restou a criação de uma cadeia que agregaria todos os elementos do projeto, e que assim pudesse ser representado em formato de tabela o quantitativo desses elementos aplicados na habitação. A princípio, para agregar os itens de telhado foi utilizada uma lógica bastante similar à lógica utilizada para a filtragem e geração de telhados em suas respetivas posições: os elementos foram importados regularmente no *Grasshopper* através da função *Graphical Element*. Posteriormente, foram ligadas à função *Element Name*, que traz as informações de nome e categoria do elemento que foram atribuídas no *Revit*. Dessa maneira, as informações de nome foram direcionadas à uma função *GHPython*, que trazia como *output* o nome do elemento que é aplicado na construção.

Ao aplicar essa lógica a todos os painéis de fechamento e aos telhados, restou apenas fazer a reunião de todos os elementos de telhado. Foi desenvolvida uma cadeia para a criação da lista: nessa cadeia os resultados das funções *GHPython* referentes aos telhados foram direcionados para a função *Merge* (agrega informações), que por sua vez direcionou os nomes dos elementos para as funções *Element Name* e *Member Index* (coleta o nome e a referência dos elementos na lista), além de *Create Set* (cria uma combinação e soma os elementos de nome igual). Importante de se destacar que ocorreu a existência de um erro na função *Element Name*, mas essa foi esperada devido à necessidade de processar e barrar entradas nulas. Ao final dessa cadeia, os dados foram novamente reunidos através da função *Merge* e por fim direcionados à função *Panel* (visualização de informações em formato textual), onde então foi possível visualizar a contabilização dos elementos dos telhados (Fig. 102 e 103).

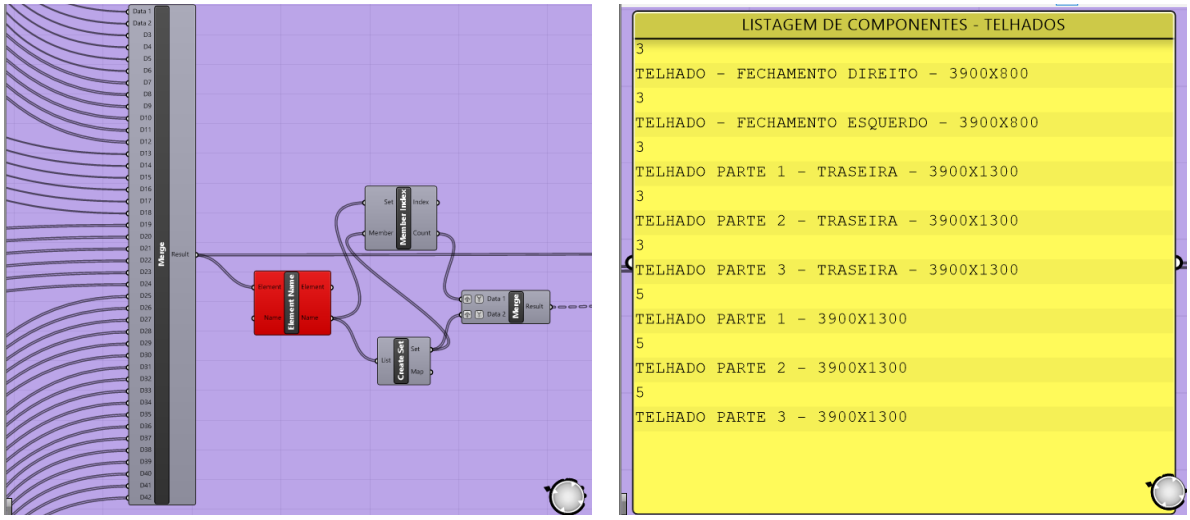


Fig. 102 e 103: Cadeia de criação de lista; Função *Panel*, com o quantitativo de elementos do telhado de uma habitação de tipologia T3.

A fim de se gerar a junção final de todos os elementos do projeto em uma lista única, todos os elementos dos módulos (paredes, pisos e estruturas) também foram agregados em funções *Merge* próprias. Desse modo, as informações provenientes de cada uma das funções *Merge* dos seis módulos e dos telhados foi agregada em uma cadeia final, essa que pode ser considerada um agrupamento de outros agrupamentos, mas com uma codificação ideal que soma os elementos iguais mesmo se forem de módulos diferentes. As informações foram estruturadas (elementos de nomes semelhantes foram contados), e por fim pode-se ver através da função *Panel* a listagem final de elementos de toda a edificação (Fig. 104).



Fig. 104: Parte de lista de elementos de edificação de tipologia T3.

- REORGANIZAÇÃO

Uma peça chave para o sucesso do Modelo Paramétrico é também a sua leitura e organização, o que tende a tornar seu uso mais intuitivo e consequentemente mais rápido. Dessa maneira, todas as chaves seletoras foram reorganizadas em um painel com 3 distintas funcionalidades: Geração de Habitação (Fig. 106), Edição da habitação gerada (Fig. 107) e Lista de elementos da habitação gerada. Dessa maneira, os principais recursos do Modelo puderam ser reunidos em uma seção específica (Fig. 105).

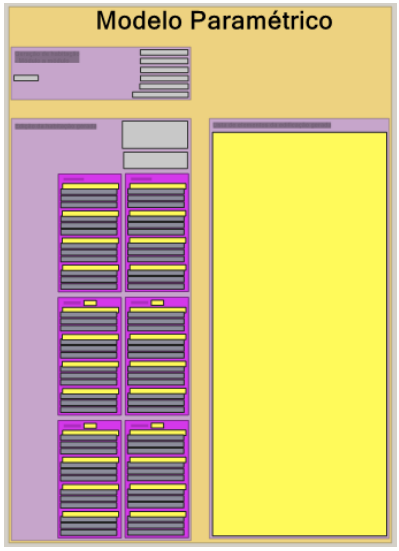


Fig. 105: Perspectiva geral das cadeias de funções com os blocos das quatro funcionalidades (Geração de Habitação no topo, Edição da habitação gerada no canto inferior esquerdo e Lista de elementos da habitação gerada no canto inferior direito).



Fig. 106: Chaves seletoras iniciais para a Geração de Habitação.



Fig. 107: Parte de bloco de Edição da habitação gerada, onde se realiza alterações no *deck*, na posição da escada frontal e em todos os painéis da edificação.

3.6.7 TESTES DE USABILIDADE E VALIDAÇÃO

Para a execução dos testes e a validação do Modelo Paramétrico, almejou-se um ensaio de geração e edição de uma habitação em que seriam testadas todas as funcionalidades possíveis. Após ser definido que a habitação teria 4 quartos (T4), foram escolhidos os valores "P5", P12", P3" e "P18" para as posições dos quartos (Fig. 108). O Modelo levou 17 segundos para adicionar cada novo quarto.

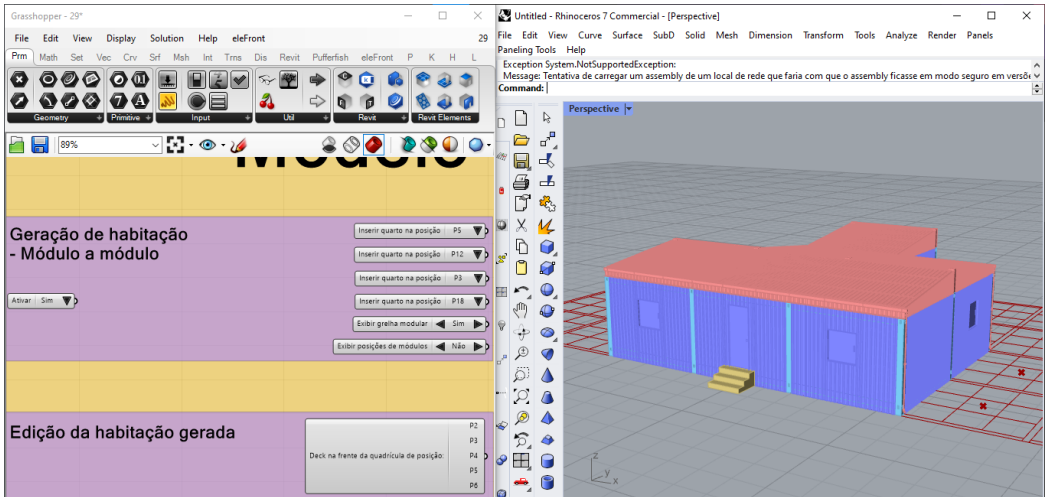


Fig. 108: Parâmetros definidos inicialmente e perspectiva frontal da habitação gerada automaticamente.

- CONFERÊNCIA PARCIAL DA HABITAÇÃO GERADA

Foi realizada uma análise preliminar da geometria da edificação antes da edição. No que toca o exterior, foi verificado que todas as condicionantes foram cumpridas: todos os compartimentos tiveram janelas nas posições que anteriormente foram codificadas nas funções *GHPython*, os telhados tiveram o sentido correto de queda atribuído e todos os componentes foram posicionados em seus devidos lugares.

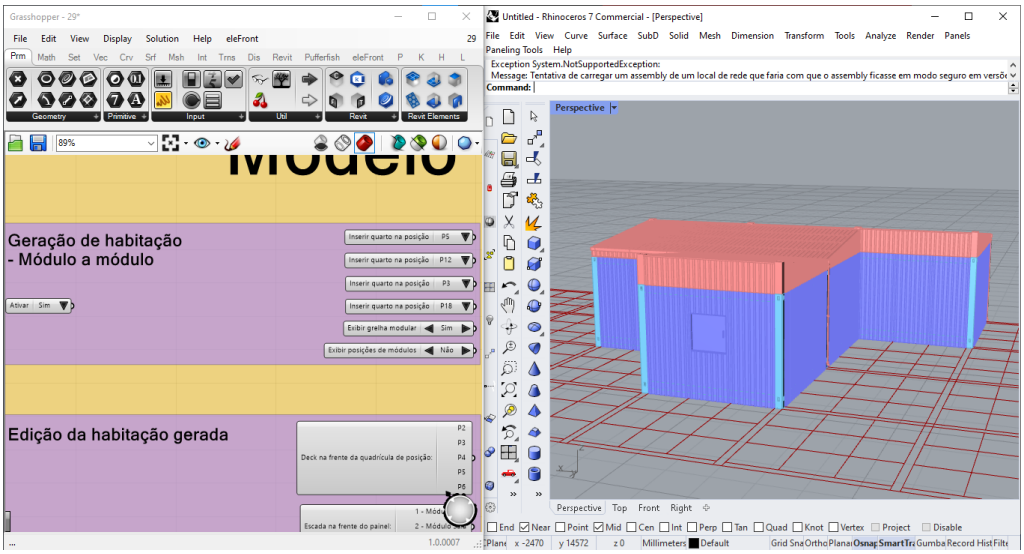


Fig. 109: Parâmetros definidos e perspectiva traseira de habitação gerada automaticamente.

Ocorreu também uma análise interna. Para tal, os telhados, lajes de cobertura e alguns itens de mobiliário foram ocultados a fim de se melhorar a visualização. Relativamente ao quarto na posição P3 (Fig. 110), a porta de 800mm de largura foi gerada na parede e na posição de painel correta, exatamente a posição P3 da parede 2.

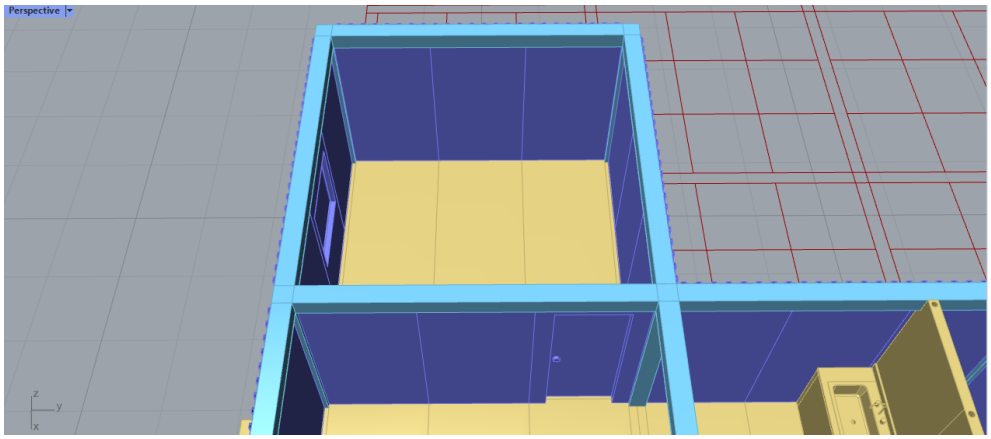


Fig. 110: Perspectiva superior com quarto da posição P3.

Relativamente aos quartos das posições P5 e P12 (Fig. 111), as portas de 800mm de largura também foram dispostas nas posições desejadas. No quarto da posição P18 (Fig. 112), também se verificou sucesso na exploração, recebeu a porta de 800mm de largura nas posições P3 da parede 1.

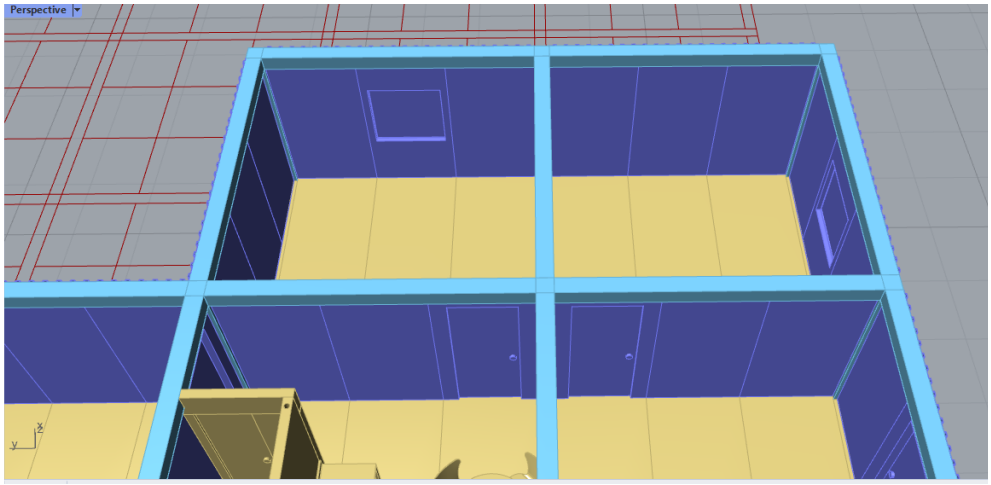


Fig. 111: Perspectiva superior com quartos nas posições P12 e P5 ao centro.

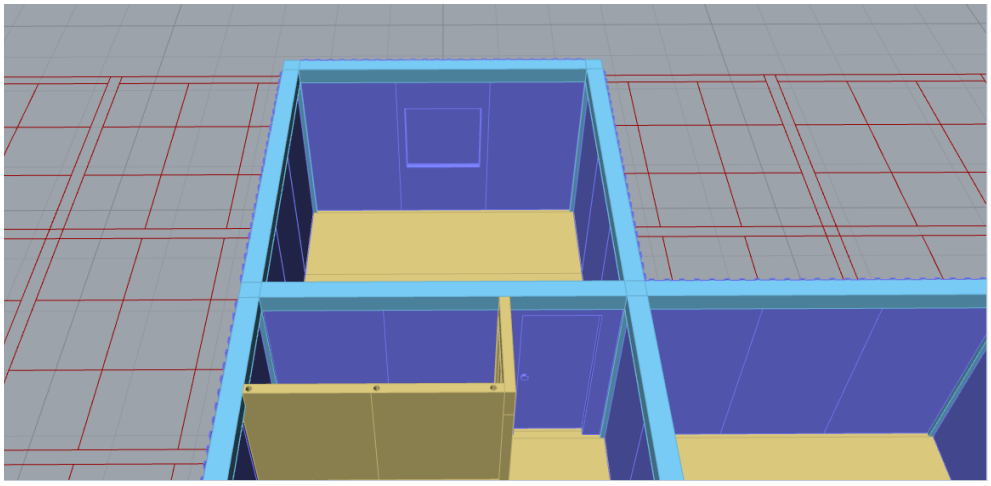


Fig. 112: Perspectiva superior com quarto na posição P18 ao centro.

Também foram verificadas as ordenações internas do Núcleo-base (Fig. 113), onde foi codificado para não haver painéis entre a sala e cozinha, gerando assim um espaço coletivo de maior amplitude possível.

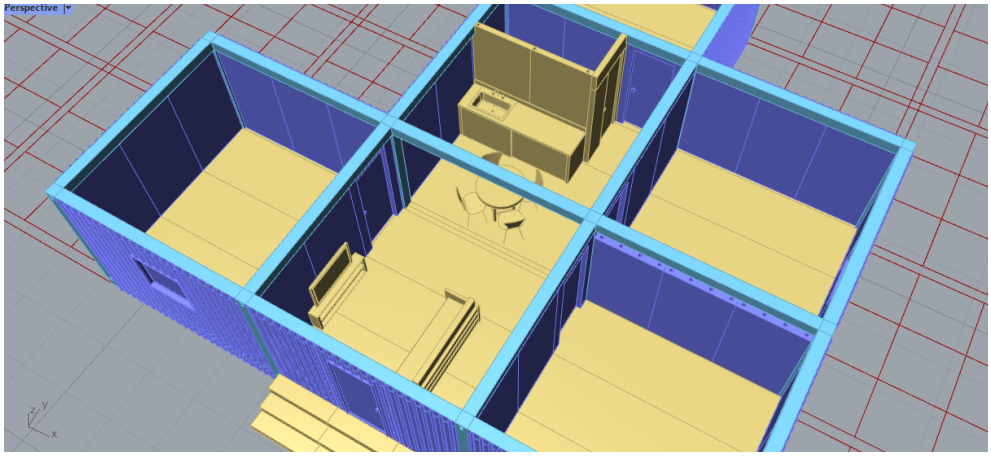


Fig. 113: Perspectiva superior com Núcleo-base na porção inferior central.

Findada a conferência, constatou-se que visualmente o projeto se mostrou adequado a tudo que foi desenvolvido e aos parâmetros que foram introduzidos.

- TESTE DAS FUNCIONALIDADES DE EDIÇÃO

Ao passo que enquanto um dos objetivos do Modelo Paramétrico foi a geração automática de projetos construtivos, concatenou-se a esse objetivo a possibilidade de editar a posteriori o projeto gerado automaticamente. Dessa maneira, partiu-se para a realização de alterações no projeto, essas que foram realizadas aleatoriamente, sem compromisso com algum contexto funcional ou geográfico específico.

A priori, foi definido que seria inserido um *deck* defronte as paredes 1 dos módulos das posições P3, P4 e P5 (Fig. 114). Tal geração levou dois segundos e também alterou automaticamente a posição da escada (que estava disposta à frente do Módulo Sala) para a frente do *deck* (Fig. 115).



Fig. 114: Parâmetros configurados.

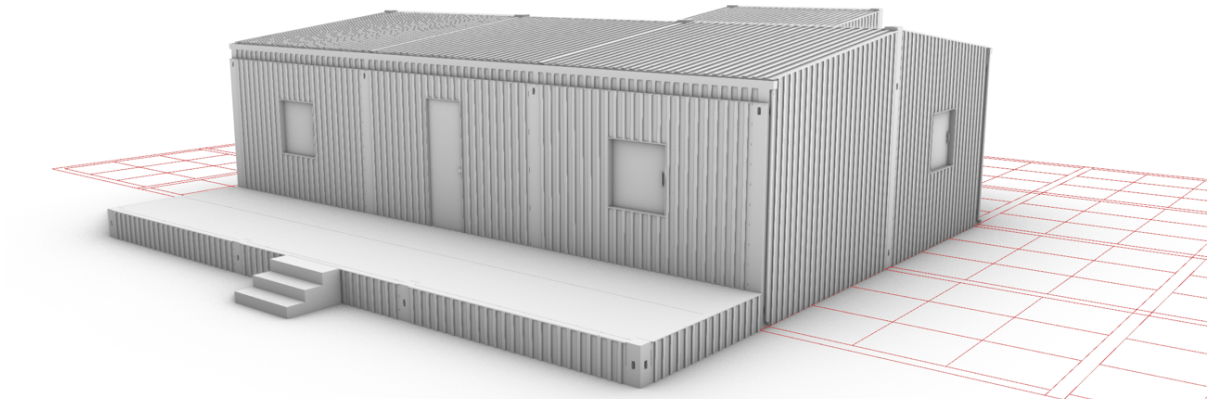


Fig. 115: Perspectiva da habitação onde se vê a fachada frontal e a fachada direita.

A fim de gerar maior abertura frontal, foi definido a troca de todos os painéis da parede 1 do módulo NS por um painel de parede de vidro com porta de 2000mm x 800mm. Em seguida, foi definido a troca dos painéis de janela da parede 1 dos módulos das posições P3 e P5 por painéis opacos. As janelas desses mesmos módulos foram deslocadas para suas laterais. O módulo da posição P18, por sua vez, teve sua janela da parede 3 trocada por um painel de vidraça de 2000mm x 1000mm. Cada uma dessas trocas levaram um segundo para serem efetuadas (Fig. 116 e 117).



Fig. 116: Perspectiva da habitação após alteração dos painéis, onde se vê a fachada frontal e a fachada direita.

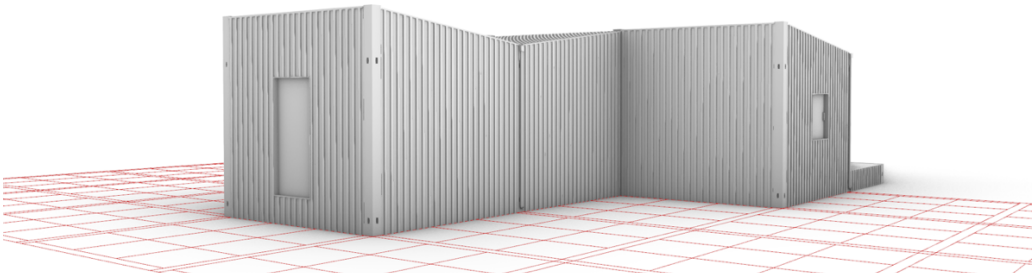


Fig. 117: Perspectiva da habitação após alteração dos painéis, onde se vê a fachada traseira e a fachada esquerda.

- CONFERÊNCIA FINAL

Como forma de confirmar a integridade da geometria após a edição, foi realizada uma última conferência, dessa vez através de um sequenciamento construtivo genérico. Dessa maneira, por ordem, se verificou a ordenação da estrutura (Fig. 118), das placas de pisos e de *deck* (Fig. 119 e Fig. 120), dos painéis (Fig. 121), das lajes de cobertura (Fig. 122) e dos telhados (Fig. 123).

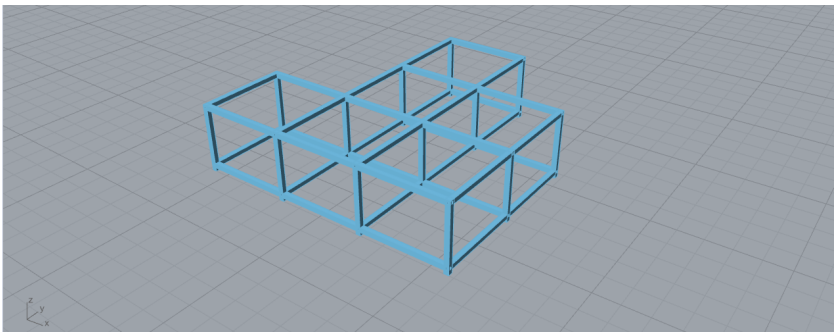


Fig. 118: Perspectiva da estrutura da habitação.

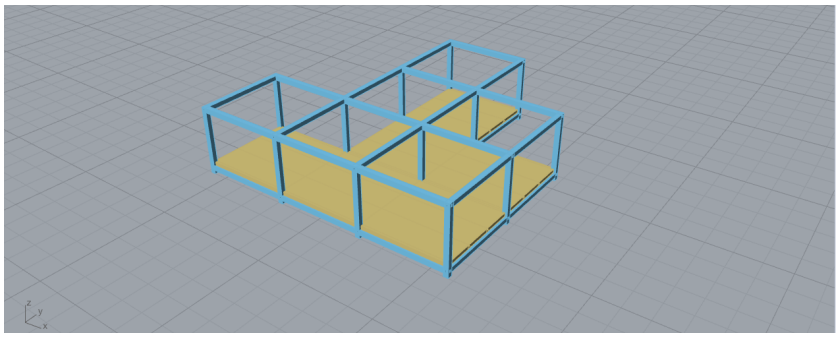


Fig. 119: Perspectiva da estrutura e placas de piso da habitação.

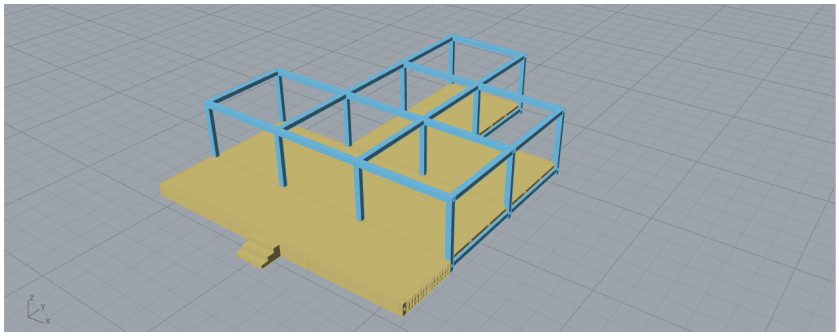


Fig. 120: Perspectiva da estrutura e placas de piso e de *deck* da habitação.

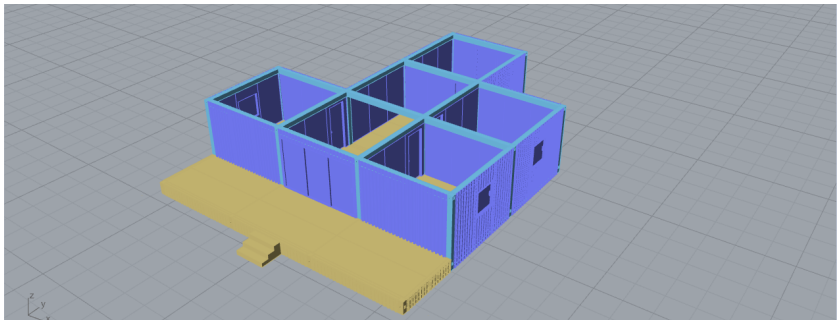


Fig. 121: Perspectiva da estrutura, placas de piso e de *deck* e painéis da habitação.

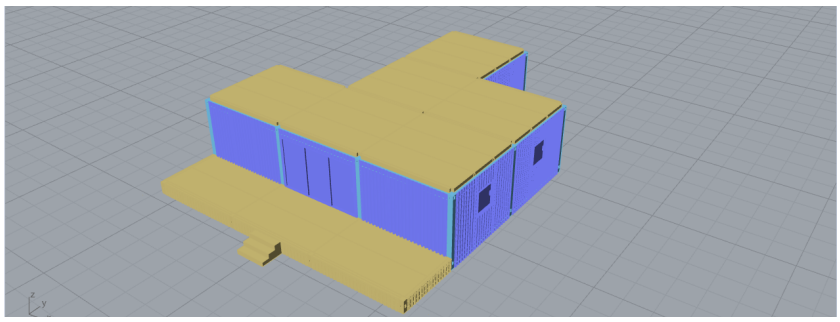


Fig. 122: Perspectiva da estrutura, placas de piso e de *deck*, painéis e laje de cobertura da habitação.

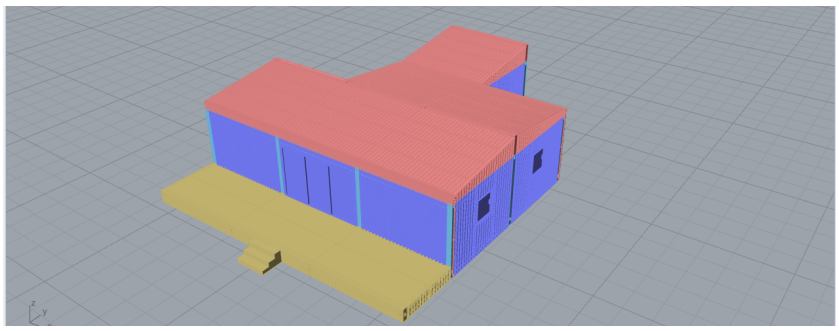


Fig. 123: Perspectiva da estrutura, painéis de piso e de *deck*, painéis, laje de cobertura e telhado da habitação.

Observou-se que todas as trocas efetuadas funcionaram como o esperado. O fator de destaque para essa etapa de edição foi a eficiência em cada uma das alterações, processando instantaneamente cada comando e sem nenhuma espécie de constrangimento.

- TESTE DE GERAÇÃO DA LISTA DE COMPONENTES

Por fim, foi realizada a conferência da última das funcionalidades do Modelo Paramétrico, a elaboração da Lista de Elementos, essa que sempre é criada a cada nova geração de projeto de habitação e atualizada a cada alteração de elemento construtivo. A estratégia tomada para analisar a Lista de Elementos foi cruzar o quantitativo de seus elementos com os elementos geométricos exibidos na tela - qualquer discrepância poderia indicar duplicidades ou ausências de elementos na Lista.

Posteriormente à análise, foi constatado que a Lista incluiu todos os elementos da edificação, sem nenhum desencontro entre seu conteúdo e a representação gráfica do projeto. Foi conferida a utilização de 30 tipos diferentes de elementos na habitação. Devido ao facto de alguns componentes se repetirem demasiadas vezes (como pilares e vigas, por exemplo), foi verificado que a habitação possui no total 251 elementos. A Lista contendo todos os elementos gerados para a habitação e as respetivas plantas encontram-se em anexo (ANEXO IV).

3.7 CONSIDERAÇÕES SOBRE O DESENVOLVIMENTO DO CASO DE ESTUDO

Ao passo que o Caso de Estudo foi finalizado, neste momento há de se abordar os pontos positivos e negativos encontrados ao longo do seu desenvolvimento, o que guiará a correção de eventuais constrangimentos, a percepção de potencialidades do Modelo Paramétrico e consequentemente permitir o aprimoramento do mesmo. A priori, cabe pontuar que os objetivos esperados para essa fase foram concluídos com sucesso. O Modelo Paramétrico conseguiu corresponder às funcionalidades previstas de forma estável, isto é, sem gerar produtos falhos ou ser interrompido por algum erro de codificação. O teste de validação, que durou 2h30m e passou por suas principais funcionalidades, consolidou essa constatação. Dessa maneira, percebe-se que o Modelo tem solidez e abre margem para futuros refinamentos, sempre em busca de se atender o maior número de contextos que for possível.

Relativamente à agilidade do processo, embora a funcionalidade de edição (troca de componentes de projeto gerado) tenha se verificado instantânea, foi observado que o Modelo Paramétrico demorou para ser carregado em todas as vezes que o *software Grasshopper* foi iniciado (cerca de 5 minutos), além de a geração de cada projeto demorar cerca de 17 segundos. Isso deve-se à grande quantidade de funções e elementos inseridos no Modelo. Cabe a ressalva de que o computador utilizado ao longo do processo é um modelo produzido há dez anos. No entanto, também se sabe que o tempo de início do Modelo Paramétrico e de geração de plantas pode vir a ser reduzido com um trabalho de otimização do Modelo. Essa tarefa passa pela eliminação de funções ambíguas e reescrita de códigos, fazendo assim com que o arquivo final se torne mais leve. Como ganho adicional, essa leveza faz com que a interface se torne mais limpa e melhore a experiência do usuário na utilização do Modelo Paramétrico.

A posteriori, foi verificada a necessidade de funções dedicadas à extração de dados. Foi percebida a necessidade de funções para exportar os dados da lista de elementos construtivos para um arquivo compatível com o *software Excel*, constituindo assim um fluxo de trabalho corrente que facilitaria o tratamento desses dados. Tal problema pode ser sanado com a aplicação de algum *plugin* para *Grasshopper* feito por desenvolvedores independentes. Ademais, a geração das plantas do projeto também não foi ideal, visto que os elementos geométricos necessitaram ser convertidos em linhas/vetores (através da função *Bake*) para o *Rhinoceros* realizar a correta leitura das linhas que constituem o desenho e preparar a plotagem. O *Rhinoceros*, que outrora servia somente como visualizador das informações do *Grasshopper*, passou a ser responsável pela tarefa de replicar o projeto com objetos de maior complexidade, o que gerou constrangimentos e um gasto de tempo maior. Há de se estudar, portanto, métodos para tornar esse processo mais célere ou desenvolver uma cadeia de

funções que faça com que o projeto gerado não necessite de ir ao *Rhinoceros*, mas que retorne ao *Revit* como uma conjunção de famílias, o que potencialmente requer menos processamento do computador.

Ainda referente aos projetos gerados pelo Modelo Paramétrico, percebeu-se que mais opções de personalização enriqueceriam os resultados finais. Mais possibilidades de grelhas modulares abririam possibilidade para gerar habitações para contextos diferentes – e a combinação de módulos de malhas diferentes poderiam gerar volumetrias interessantes. Outra estratégia interessante seria a modelação de novos elementos e a criação de novas cadeias de código que permitam que os projetos evoluam verticalmente. Ademais, ter mais opções de materiais externos e internos também gerariam possibilidades interessantes de personalização.

Há de se pontuar que em momento algum o enfoque deste trabalho foi a realização de modelações de componentes com maior grau de pormenorização, mas a criação de um Modelo Paramétrico funcional que conjugasse todos os conceitos investigados no Estado da Arte. Ao passo que o Modelo foi concluído, percebe-se que para passos futuros seria interessante essa pormenorização dos componentes, de forma que seja possível apresentar com clareza as infraestruturas e estabelecer os pormenores de encaixes e juntas de todo o conjunto. Tal atitude tem impacto positivo no que diz respeito à futura produção dos projetos gerados pelo Modelo Paramétrico, visto que dita os trabalhos feitos de forma *off-site* e *in situ*.

Diante do que foi exposto, as informações relativas aos pontos positivos e negativos foram sintetizadas.

- Observações positivas:
  - Todas as funções funcionaram e cumpriram o que foi proposto;
  - A troca de componentes pós-geração foi rápida;
  - A lista de quantitativos se mostrou adequada ao projeto gerado.

- Observações negativas:
  - Tempo longo para abrir o programa e o tempo para gerar uma habitação pode ser otimizado;
  - Necessita de mais funções para facilitar a extração das informações (Excel e plantas);
  - Necessita de mais opções de personalização;
  - Necessita de mais opções de grelhas mantendo a unidade modular de 1200mm (M);
  - As infraestruturas e os elementos construtivos necessitam de maiores detalhamentos.

Ciente dessas observações, foi montado um quadro (Tab. 20) que direciona passos futuros para o Modelo Paramétrico.

Tab. 20: Futuras intervenções a serem feitas no Modelo Paramétrico e justificativas.

Iniciativa	Justificativa
Desenvolver funções que possam substituir ou simplificar cadeias, buscar métodos de reduzir o código escrito nas funções *GHPython*	Fazer com que o Modelo Paramétrico tenha uma geração de projetos mais rápida e simplificar a interface.
Modelar a conexão dos elementos estruturais ao realizar chanfros nas vigas e pilares para encaixe de chapas metálicas de junção	Tornar os projetos mais aproximados da realidade e aproximá-lo das práticas construtivas *off-site* e *in situ*
Criar painéis externos com chapas em materiais e padrões diferentes	Permitir maior personalização da edificação

Criar novas grelhas modulares mantendo a métrica de 1200mm	Abrir possibilidades para diferentes contextos socioeconómicos
Realizar adequações na infraestrutura para a instalação mais facilitada dos elementos e para a melhoria da manutenção do Módulo QB	Fazer com que a instalação não tenha riscos de rutura de elementos e que os reparos possam ser executados por apenas uma pessoa
Criar novos componentes e condicionantes em códigos que permitam que a habilitação evolua verticalmente	Abrir possibilidades para novas tipologias e volumetrias que se adequem a contextos diferentes
Criar cadeias de funções visando a exportação dos dados de lista para planilha em formato .csv e das plantas em formato .dxf	Fazer com que os dados sejam mais fáceis de serem extraídos e tornar a conexão entre equipas de projeto e produção ainda mais fluída

- ATUALIZAÇÃO DA LISTA DE REGRAS DE COMPOSIÇÃO

Por fim, referente à Lista de Regras de Composição, objeto que pode ser considerado o elo entre o Modelo Paramétrico do Caso de Estudo e o trabalho investigativo do Estado da Arte, se conclui que a Lista foi providencial para o sucesso dos trabalhos: ajudou a coordenar modularmente a planta, a definir a geometria dos componentes e a trabalhar a relação de elementos. Conforme exposto ao longo desse processo, algumas de suas regras foram atualizadas devido a questões técnicas (Tab. 21). No entanto, por mais que tenham sido mudadas, jamais deixaram de discordar com as boas práticas estudadas nas temáticas no Estado da Arte. Vicissitudes são naturais em projetos desse vulto, marcas de um processo dinâmico que envolveu continuamente trabalhos de investigação, reflexão e experimentação.

Tab. 21: Atualização da Lista de Regras de Composição.

Nº da Regra	Regra inicial	Foi alterada?	Observação
1	A edificação deve começar a partir de um Núcleo-base.	Não	-
2	As fachadas da edificação devem ser inseridas em uma grelha de 3600mm x 3600mm, que deve possuir uma unidade métrica (M) predefinida de 1200mm.	Não	-
3	A estrutura da edificação deve ser inserida em outra grelha, que é estrutural e que possui 3800mm x 3800mm	Não	-
4	Edificação deve evoluir em módulos de metragem similar aos módulos do Núcleo-base	Não	-

5	Edificação deve evoluir “em linha”, até chegar à quantidade máxima de 6 blocos (2 x 3)	Sim	Outra estratégia de evolução foi tomada: foram criadas novas plantas com a condicionante de que os módulos adicionais deveriam dividir ao menos uma das paredes com o Núcleo-base.
6	O núcleo base e os módulos adjacentes devem possuir vigas e pilares em CLT com perfil de 200mm x 200mm	Não	-
7	A estrutura deve ser desconectada das fachadas	Não	-
8	As infraestruturas devem ser direcionadas à habitação até um espaço entre o solo e o piso e devem evoluir verticalmente através dos blocos	Não	-
9	Com exceção do Módulo QB, nenhum dos elementos deve superar as dimensões de 2120mm (altura), 2100mm (largura) e 5400mm (comprimento) para que seja compatível com camiões de caixa de 25,3m^3.	Não	-
10	Deve ser definido um Bloco Padrão e mais 3 Blocos Específicos, todos esses contendo chapas externas de materiais e dimensões similares	Sim	Os blocos de parede foram trocados por um modelo inteiriço de painel, esse de 2800mm x 1200mm x 150mm.
11	Devem ser definidos painéis pré-fabricados contendo variados perfis de aberturas, sendo que esses devem ter dimensões laterais baseadas na unidade modular e altura baseada no pé-direito da construção	Não	Foram criados ao longo do desenvolvimento mais modelos de painéis a fim de tornar a gama de opções de personalização mais ampla.

12	O Núcleo-base e os módulos adjacentes devem ser dispostos sobre uma fundação de sapatas de betão armado, sendo cada uma no eixo dos pilares	Não	-
13	Os blocos para paredes externas devem ser aparafusados em montantes verticais, esses que devem ser afixados à estrutura, sendo que o espaçamento dos montantes deve ser correspondente à mesma unidade modular dos blocos	Sim	Os montantes foram eliminados, os painéis externos passaram a ser afixados nas vigas inferiores e superiores.
14	Devem ser projetados painéis metálicos externos à construção	Sim	Os painéis metálicos foram agregados aos painéis externos.
15	Os blocos para piso de cada módulo devem ser dispostos e aparafusados sobre 3 quadrículas vazadas que ficam no espaço interior das vigas, de modo que assim a modulação seja mantida e os painéis de vedação possam se assentar completamente sobre as vigas	Sim	Os blocos de piso foram trocados por blocos maiores, esses de dimensão de 3700mm x 1200mm x 100mm.
16	A estrutura deve ter suas vigas e pilares unidos por parafusos	Não	-

4

CONSIDERAÇÕES FINAIS

4.1 RESPOSTA AO PROBLEMA COLOCADO

Findados os trabalhos investigativos do Estado da Arte e a produção do Caso de Estudo, se conclui que houve uma resposta adequada às problemáticas estipuladas no primeiro capítulo deste trabalho de dissertação, problemáticas que são vinculadas à ineficiência da exploração dos potenciais ganhos que a construção industrializada pode trazer.

Desde o princípio se esperou que o estudo das temáticas de DfMA, arquitetura evolutiva, *design* paramétrico e construção modular e pré-fabricada investigadas do logo do Estado da Arte trouxessem luz sobre os temas e respostas, informações que estruturariam uma futura Lista de Regras de Composição, essa que por sua vez embasaria um produto final que poderia ser interpretado como um compêndio de todo o processo. Com esses fatores em mente, o trabalho se desenvolveu, a Lista de Regras de Composição foi produzida e posteriormente embasou quase que inteiramente o produto do Caso de Estudo, sendo que nos casos excecionais que alguma regra foi subvertida, a nova informação em momento algum deixou de ser condizente com o que foi estudado no Estado da Arte.

O desenvolvimento do Caso de estudo, que sempre teve em seu cerne a intenção de gerar uma plataforma de geração rápida de projetos arquitetónicos de edificações, teve como produto um Modelo Paramétrico que pode ser facilmente manipulado. No entanto, percebe-se que o mesmo deixa aberturas para vir a ser aprimorado, visto que o processo de *design* desse tipo de produto é cíclico e jamais deve ter como objetivo uma parada final, além de o facto de que as temáticas investigadas contem um universo de informações que são postas em certames diariamente por setores produtores e académicos.

4.2 OBJETIVOS PROPOSTOS E RESULTADOS ALCANÇADOS

Após todo o processo de investigação e desenvolvimento, conclui-se que houve satisfatório cumprimento dos objetivos. Os quatro pontos relativos aos objetivos gerais e os seis pontos relativos aos objetivos específicos foram abordados.

- **Objetivos gerais**
  1. **Identificação das principais problemáticas e desafios atuais no que tange o projeto de habitações pré-fabricadas:**
     - Receio de inovar em intervenientes, o que leva a tornar mais lento o crescimento da construção industrializada (Qi et al. 2021);
     - Dificuldade de explorar todo o potencial da construção industrializada, o que ocasiona em problemas com custos e tempo (Abd Razak et al. 2022);
     - Falta de mão de obra especializada (Abd Razak et al. 2022);
     - Constrangimentos devido a questões técnicas e limitada troca de informação (devido ao uso de diferentes softwares e máquinas) (Qi et al. 2021);
     - Necessidade de estabelecer um processo integrado na fase de pré-projeto para minimizar riscos de falhas na pré-fabricação (Smith 2010, 53);
     - Desvalorização do público devido ao facto da construção industrializada ser mais cara e ter maior desvalorização do que a construção tradicional e a visão de que o transporte de elementos da fábrica até o sítio de construção ocasiona problemas estruturais (M. Panjehpour e A. A. Abang Al 2013);
     - Estigmas da construção industrializada por parte do público, nomeadamente a visão de que a construção feita de forma *off-site* tem *design* repetitivo e de baixo valor arquitetónico (Dayne W. Kenny et al. 2022).

  2. **Pesquisas sobre a conceituação e regras referentes à construção industrializada, arquitetura evolutiva, DfMA e *design* generativo na contemporaneidade.**
     - Os quatro temas foram identificados e enquadrados na proposta desta dissertação. Para além de trazerem luz sobre os temas, impactaram na criação da Lista de Regras de Composição.

  3. **Reflexão sobre os conteúdos encontrados:**
     - Ao longo do Estado da Arte e Caso de Estudo, todos os conteúdos foram continuamente analisados, filtrados e sintetizados, de forma que o projeto final se tornasse alinhado às temáticas investigadas;

  4. **Apontamento de possíveis melhorias no escopo da construção industrializada:**
     - Adoção de um Modelo Paramétrico que consiga gerar projetos através da introdução de informações elementares e utilizando um sistema construtivo pré-estabelecido, o que leva a diminuição de tempo e orçamento;
     - Inserção no Modelo Paramétrico de uma linguagem única que seja simples para todos os intervenientes, visando a aproximação das equipas de projeto e produção;
     - Inserção no Modelo Paramétrico de diferentes componentes que exerçam a mesma função, de forma que a habitação se torne mais personalizável e diminua o estigma de que a habitação pré-fabricada é um produto final de baixa variabilidade;
     - Reconhecimento da importância de um processo colaborativo nas fases iniciais do projeto, o que tende a guiar a produção de elementos de maior qualidade;
     - Adoção de uma estrutura metodológica que vise maior sustentabilidade ao absorver pontos de todas as fases da vida de uma construção industrializada, nomeadamente relativas ao projeto, produção, transporte, montagem, utilização e pós-utilização.

- **Objetivos específicos**
  1. **Definição dos componentes mais importantes em uma edificação pré-fabricada, em vista de incorporá-los ao projeto:**
     - Os componentes principais foram definidos e posteriormente modelados em três dimensões;

2. **Definição de melhores estratégias de evolução arquitetónica, também em vista de incorporá-las ao projeto:**
    - As estratégias de evolução foram devidamente investigadas. Posteriormente as estratégias foram estudadas e contextualizadas, fazendo com que o modelo de evolução da empresa *"Njordrum"* e a "Casa Pátio Japonesa" inspirassem o Modelo Paramétrico.

3. **Busca de práticas para dar ao morador-usuário a possibilidade de personalização, fazendo com que o mesmo se sinta pertencente à habitação em que vive;**
    - Foi inserido no Modelo Paramétrico um sistema construtivo capaz de gerar distintas configurações dentro de uma mesma tipologia e que pode ser alterado/evoluído durante o uso de acordo com o desejo do usuário. Além disso, foi pensada uma estrutura (suporte) que fosse desconectada, permitindo assim melhor customização do interior (conteúdo).

4. **Definição de materiais de interesse:**
    - Foram definidos os materiais para utilização nos projetos do Modelo Paramétrico, com destaque para o aço e a madeira em CLT, essa que tem grande apelo na atualidade devida sua resistência.

5. **Definição de um *software* de *design* generativo que permita explorações:**
    - Foi definida a utilização do *Rhinoceros + Grasshopper* e *Revit*, combinação bastante reconhecida de *softwares* que permitem a modelação em três dimensões e o *design* através de parâmetros;

6. **Criação de um Modelo Paramétrico modular de uma habitação tipo:**
    - Foi criado um Modelo Paramétrico em consonância com todo o conteúdo exposto na Lista de Regras de Composição, nas temáticas investigadas e na lógica de construção;

7. **Validação do projeto, coleta de informações e direcionamento para futuros estudos:**
    - O Modelo Paramétrico foi devidamente testado e validado, chegando-se a um resultado final bastante positivo, onde se pôde comprovar funcionamento das funcionalidades esperadas, nomeadamente a geração de projetos através do posicionamento dos quartos, a possibilidade de mudanças de painéis e a visualização dos elementos construtivos em lista. Ademais, uma série de diretrizes para desenvolvimentos futuros foi criada (Subcapítulo 4.6).

4.3 RESULTADOS ALCANÇADOS NOS CAPÍTULOS ANTERIORES

Findado o período de desenvolvimento deste presente trabalho, chega-se à conclusão de que o processo cumpriu com o expectável e, para além do Modelo Paramétrico, teve como ganhos em nível pessoal um aprendizado multidisciplinar. Dentro do escopo da arquitetura, trouxe uma maior consideração sobre como produzir ambientes de qualidade em um contexto limitado espacialmente, e como uma sutil alteração de características físicas de um elemento construtivo pode causar desconexões que podem comprometer o todo. Também, trouxe uma maior compreensão sobre a importância de reconhecer a importância de se fazer uma arquitetura conectada ao usuário, e que sempre se deve tentar dar ao usuário ferramentas para que possa personalizar o espaço que vive. No escopo da engenharia civil, trouxe uma maior compreensão sobre a articulação entre sistemas distintos, o que exige uma eterna atenção para as infraestruturas que "duelam" pelo mesmo espaço. No escopo das ciências da computação, trouxe a compreensão sobre como se projetar uma habitação a partir de códigos: como a lógica arquitetónica

pode ser transposta para uma linguagem de programação através da conversão de regras arquitetónicas e condicionantes específicas.

Ao se analisar cada etapa em seus pormenores, para além do embasamento para a Lista de Regras de Composição, aponta-se de positivo do Estado da Arte o reconhecimento de que suas temáticas apontam um possível campo a ser explorado: ao passo que foi detetada certa carência de trabalhos coligando os temas do DfMA, construção pré-fabricada modular, *design* generativo e arquitetura paramétrica e ao passo que esses campos apresentam uma infinitude de informações, se enxerga uma possibilidade de continuação de trabalhos investigativos que debatam essas temáticas, com o claro objetivo de produzir conhecimento e orientar novas práticas para a indústria da construção civil. Já no que se diz respeito ao Caso de Estudo, seu produto se mostrou palpável e apto a ser mais desenvolvido, agregando novas funcionalidades, inserção de informações de banco de dados externos e mais possibilidades de personalização. Cabe pontuar que o tempo de geração de cada planta (em torno de 17 segundos) foi percebido como longo, entretanto a simulação foi realizada em um computador portátil com configurações destoantes dos modelos da atualidade. De qualquer maneira, uma estratégia efetiva que poderia ser tomada para se resolver esse problema seria a readequação de algumas cadeias de funções e a otimização de códigos de funções *GHPython*, ou seja, a adoção de atitudes que visem a simplificação do Modelo Paramétrico até se atingir um conteúdo mínimo, mas que ainda consiga entregar as funcionalidades desenvolvidas. Dessa maneira, o Modelo se tornaria mais leve e apto a funcionar da maneira mais eficiente.

4.4 CONTRIBUTO PARA O CONHECIMENTO DA TEMÁTICA

Ao passo que o produto final foi um compêndio das temáticas investigadas, essas desbravadas para responder à problemática de pesquisa, espera-se que esta dissertação sirva como base para futuras investigações. Há de se pontuar que as pesquisas bibliométricas realizadas no segundo capítulo apontaram que as temáticas investigadas neste trabalho, por mais que sejam do mesmo campo geral, ainda necessitam de maior aproximação, o que faz com que os empenhos realizados neste trabalho sejam reconhecidos. Desse modo, espera-se para o futuro que sejam conduzidos mais estudos que vinculem essas áreas e que também vinculem metodologias e conteúdos contemporâneos, de forma que o produto final sempre esteja contextualizado com a época desejada.

Em linhas gerais, espera que a estrutura metodológica desta dissertação – que é composta por um processo tradicional envolvendo trabalho de pesquisa, sintetização de dados e desenvolvimento de produto, tendo como diferencial suas especificidades – sirva como referência futura para trabalhos congêneres e que sirva de material de consulta para todos aqueles que se interessarem pelas temáticas aqui expostas.

4.5 CONSTRANGIMENTOS DO PROCESSO

Ao passo que o processo de investigação foi fluído e objetivo, com a produção sendo realizada em tempo bastante aproximado ao que foi previsto, o processo de desenvolvimento teve uma série de constrangimentos. Isso deve-se, notoriamente à natureza do projeto envolvido: a conversão de conteúdos escritos para desenho é naturalmente complexa, principalmente se tratando de um projeto que envolve diversos elementos geométricos que necessitam do mais alto rigor para poderem trabalhar em conjunto.

Dessa forma, se observou que ao longo do desenvolvimento houve demasiado tempo gasto em remodelações de componentes, mas algo que já era expectável devido ao fluxo de trabalho corrente de

projeto construtivo. Houve também demasiado tempo para se entender as funções do *Grasshopper* e suas reais aplicabilidades, de modo que o desenvolvimento foi atravancado em diversas vezes devido à função errada (ou menos eficiente) ter sido aplicada em dado momento. Dessa maneira, o cronograma expectável para o desenvolvimento teve desarranjos em duas etapas (I e III), mas que puderam ser compensados devido ao maior esforço empregue nas outras etapas.

Ademais, outro percalço notável e que merece menção foi o momento onde houve a necessidade de estudar regras básicas da linguagem *Python*, nomeadamente seus operadores lógicos e como é feita a estruturação de códigos. A tradução de regras e condicionantes arquitetónicas para sentenças em *Python* foi um processo extenuante, mas foi uma parte inevitável do processo – essa compreensão das relações entre arquitetura e a lógica de *Python* foi essencial para o sucesso do Caso de Estudo.

4.6 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Almeja-se que o produto final desta dissertação seja sequenciado por, além das otimizações já discutidas, por novos processos investigativos que o aproximem ainda mais dos campos norteadores de seu desenvolvimento, nomeadamente o DfMA, a *design* paramétrico, a construção modular pré-fabricada e a arquitetura evolutiva. Almeja-se também que no Modelo Paramétrico possam ser incorporadas informações de bancos de dados externos que contenham coordenadas geográficas concatenadas às suas características climatéricas. Dessa maneira, o Modelo Paramétrico poderia ser configurado para modelar automaticamente a espessura de componentes e definir seus materiais em função da orientação solar e seu sítio de construção, podendo assim ser obtidos resultados alinhados à temática do conforto ambiental através dessa maior aplicação de inteligência artificial. Outra funcionalidade interessante que poderia vir a compor o mecanismo seria a possibilidade de incrementar dados relativos à quantidade de materiais utilizados em cada elemento, podendo-se assim realizar comparativos de materiais entre variantes dentro da mesma tipologia, indicando assim opções aos construtores para que seja realizado o projeto com melhor custo-benefício possível.

É também desejável trabalhos investigativos sobre a temática da Experiência do Usuário (*UX Design*), essa que congrega disciplinas de *design* e ciências da computação. Essa temática pode vir a trazer apontamentos para fazer com que a interface do Modelo Paramétrico seja redesenhada para se tornar ainda mais simplificada e intuitiva, de modo que facilite a geração de projetos. Essa investigação também tende a favorecer a criação de uma interface para o usuário final simular alterações em sua casa, artifício que em um momento foi cogitado devido à possibilidade de dar maior controle ao usuário, mas que ao longo do processo foi abandonado por necessidade de se focar no desenvolvimento das funcionalidades básicas.

Por fim, espera-se de bom grado que o Modelo Paramétrico seja colocado em perspetiva e, através de maiores estudos das temáticas presentes e identificação de mais problemáticas no campo da construção civil, que novas funcionalidades sejam incrementadas a esse Modelo, aproveitando-se do facto de sua estrutura já estar pronta. Espera-se também a inserção de novos componentes e módulos de metragens diferentes para que as habitações geradas combatam o estigma da invariabilidade da construção pré-fabricada e consequentemente abarquem diversos contextos socioeconómicos, tomando assim um caminho de aproximação dos (ainda) distantes conceitos da personalização e industrialização. Ao ser continuamente evoluído, o Modelo Paramétrico poderá ser colocado em execução por agentes da construção civil, possibilitando assim a geração de projetos com foco em otimização de tempo e recursos, sempre conduzidos pelas práticas mais ambientalmente responsáveis.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abd Razak, M I, M A Khoiry, W H W Badaruzzaman, and A H Hussain. 2022. 'DfMA for a Better Industrialised Building System'. *BUILDINGS* 12 (6). https://doi.org/10.3390/buildings12060794.

Banihashemi, S, A Tabadkani, and M R Hosseini. 2018. 'Integration of Parametric Design into Modular Coordination: A Construction Waste Reduction Workflow'. *Automation in Construction* 88:1–12. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.12.026.

Banihashemi, Saeed, Amir Tabadkani, and M Reza Hosseini. 2018. 'Integration of Parametric Design into Modular Coordination: A Construction Waste Reduction Workflow'. *Automation in Construction* 88:1–12.

Bogue, R. 2012. 'Design for Manufacture and Assembly: Background, Capabilities and Applications'. *Assembly Automation* 32 (2).

Boothroyd, Geoffrey. 2005. *Assembly Automation and Product Design*. CRC Press. https://doi.org/10.1201/9781420027358.

Cheng, Z., S. Tang, H. Liu, and Z. Lei. 2023. 'Digital Technologies in Offsite and Prefabricated Construction: Theories and Applications'. *Buildings* 13 (1). https://doi.org/10.3390/buildings13010163.

Dayne W. Kenny, Emma Ayesu-Koranteng, Christopher Amoah, and Ayo Adeniran. 2022. 'The Use of Prefabrication in Building'. In *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, edited by OP Publishing.

El-Zanfaly, Dina. 2009. 'Design by Algorithms: A Generative Design System for Modular Housing Arrangement'. *Proceedings of Sigradi*.

Gao, S, R Y Jin, and W S Lu. 2020. 'Design for Manufacture and Assembly in Construction: A Review'. *BUILDING RESEARCH AND INFORMATION* 48 (5): 538–50. https://doi.org/10.1080/09613218.2019.1660608.

Geraedts R., Cuperus Y., e Shing K. 2011. 'Timeless Flexible Building: Matching Demand and Supply in Flexible Housing '. *Architecture in the Fourth Dimension*.

Glogar, Isabel. 2011. 'A House for Eternity? Durability Through Change: A Study on the Adaptation History and Appreciation of Buildings in the Urban Context'. *Architecture in the Fourth Dimension*.

Hong, S M, G Kim, H Gu, T Kim, and S Choo. 2023. 'Development of Building Component Combination Algorithms for Generative Design-Based DfMA Applications'. In *Proceedings of the International Conference on Education and Research in Computer Aided Architectural Design*

in Europe, 2:207–16. https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85172459532&partnerID=40&md5=f27a182953f952fd6070125bb493520b.

Lawson, Mark, Ray Ogden, and Chris Goodier. 2014. *Design in Modular Construction*. Boca Raton, FL: CRC Press - Taylor & Francis Group.

Lim, Yaik Wah, Philip C.H. Ling, Cher Siang Tan, Heap Yih Chong, and Ashwin Thurairajah. 2022. 'Planning and Coordination of Modular Construction'. *Automation in Construction* 141 (September):104455. https://doi.org/10.1016/J.AUTCON.2022.104455.

M. Panjehpour, and A. A. Abang Al. 2013. 'A Review of Prefab Home and Relevant Issues'. *CONSTRUCŢII – No. 1*, 2013.

Qi, Bing, Mohamad Razkenari, Aaron Costin, Charles Kibert, and Meiqing Fu. 2021. 'A Systematic Review of Emerging Technologies in Industrialized Construction'. *Journal of Building Engineering* 39:102265. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102265.

Rangel Carvalho, Bárbara. 2013. 'Proposta Metodológica Para o Desenvolvimento Do Projeto Integrado de Habitação Evolutiva Em Portugal'. Porto: UPorto.

Schneider, Tatjana, and Jeremy Till. 2007. *Flexible Housing*. Amsterdam: Architectural Press.

Smith, Ryan E. 2010. *Prefab Architecture: A Guide to Modular Design and Construction*. John Wiley & Sons.

Steele Fritz. 1981. *The Sense of Place*. Edited by CBI Publishing Company Inc.

Tajul Ariffin, Hamizah Liyana, Norhazren Izatie Mohd, Nur Emma Mustaffa, Shamsulhadi Bandi, and Cecelia Ho Mei Chee. 2019. 'Perspectives on Issues and the Application of the Innovative Procurement Approaches for the Industrialised Building System (IBS)'. *International Journal of Built Environment and Sustainability* 6 (1): 39–43. https://doi.org/10.11113/ijbes.v6.n1.328.

Yingying, J. e Beisi, J. 2011. 'Customization with User Friendly Technology'. *Architecture in the Fourth Dimension*.

Archdaily, 2019. "Conceitos escandinavos para habitação modular". Acedido em 19 de janeiro de 2024. https://www.archdaily.com.br/br/923685/conceitos-escandinavos-para-habitacao-modular

Archdaily, 2021. *"Building Houses With Giant Blocks: U-Build and the Future of the Self-Construction"*. Acedido em 19 de janeiro de 2024. https://www.archdaily.com/958331/building-houses-with-giant-blocks-u-build-and-the-future-of-self-construction?ad_campaign=normal-tag

Archdaily, 2023. *"A Modular Project Like an Assembly Game: Mass Timber Prefabricated Houses"*. Acedido em 19 de janeiro de 2024. https://www.archdaily.com/998454/a-modular-project-like-an-assembly-game-mass-timber-prefabricated-houses?ad_campaign=normal-tag

Autodesk, 2024. "*Software* Autodesk *Revit*". Acedido em 29 de abril de 2024. https://www.autodesk.pt/products/revit/overview?term=1-YEAR&tab=subscription

Rangel Logistics Solutions, 2024. "Tipologia de Camiões". Acedido em 12 de abril de 2024. https://www.rangel.com/pt/infohub/tipologia-de-camioes/

RSHP (Rogers Stirk Harbour + Partners), 2024. *"ZIP House"*. Acedido em 25 de julho de 2024. https://rshp.com/projects/residential/zipup-house

U-Build, 2024. "Our designs" – U-Build". Acedido em 11 de junho de 2024. https://u-build.org/our-designs/

U.PORTO

FEUP FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO

PROPOSTA METODOLÓGICA PARA A INTEGRAÇÃO DO DESIGN GENERATIVO E DFMA EM PROJETOS DE HABITAÇÕES EVOLUTIVAS E PRÉ-FABRICADAS

ANEXOS

ÍNDICE DOS ANEXOS

ANEXO I – Relatório de Atividades do Caso de Estudo 1

ANEXO II – Elementos Constituintes do Modelo Paramétrico 35

ANEXO III – Plantas de Habitações Disponíveis no Modelo Paramétrico 49

ANEXO IV – Projeto de Validação do Modelo Paramétrico 59

ANEXO I

RELATÓRIO DE ATIVIDADES DO CASO DE ESTUDO

Este anexo detalha as principais tarefas executadas no Caso de Estudo, nomeadamente as fases de modelação 3D de componentes no *software Revit* **(Etapa II)** e codificação de parâmetros no *software Rhinoceros + Grasshopper* **(Etapas III e IV)**, tendo como objetivo final a criação do Modelo Paramétrico gerador de projetos construtivos de edificações.

Glossário:

- *Python*: linguagem de programação;
- Código: texto em linguagem *Python*;
- Função: bloco do *Grasshopper* que executa alguma alteração em um elemento;
- Cadeia: combinação de funções organizadas para se atingir determinado fim.

Todas as imagens contidas neste documento são do autor, estas que são capturas de tela geradas ao longo do desenvolvimento do Caso de Estudo.

ETAPA II - MODELAÇÃO

PASSO 1

Foram desenhados no *software Revit* componentes estruturais que correspondessem às expectativas funcionais do projeto, nomeadamente as vigas, pilares e vigas para recebimento de piso.

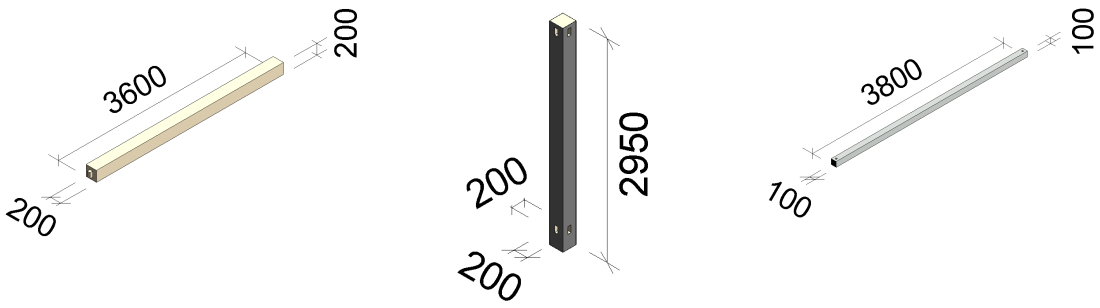


Fig.: Viga estrutural de 3600mm x 200mm x 200mm, Pilar estrutural de 2950mm x 200mm x 200mm e Vigas para recebimento de piso (4 unidades de 3800mm x 100mm x 100mm).

PASSO 2

Foram desenhados no *Revit* blocos de 1200mm x 600mm x 150mm, que após unidos verticalmente conformariam as paredes da edificação. Estes blocos seriam compostos por interior em EPS e faces exteriores em OSB.

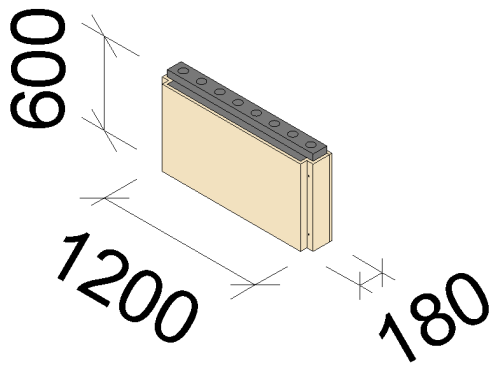


Fig.: Bloco Padrão.

Em seguida foi realizada uma atualização deste bloco, com o intuito de ser tornar menos complexo os processos de produção e de montagem.

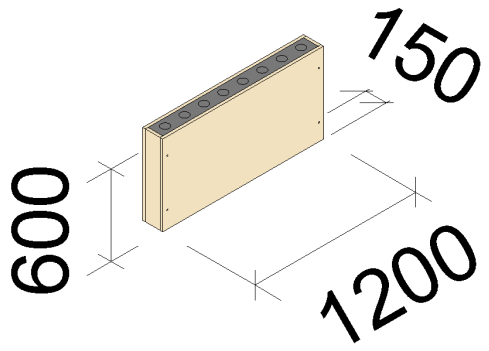


Fig.: Bloco Padrão atualizado.

PASSO 3

Foram desenhados os painéis de porta de 800mm e 600mm.

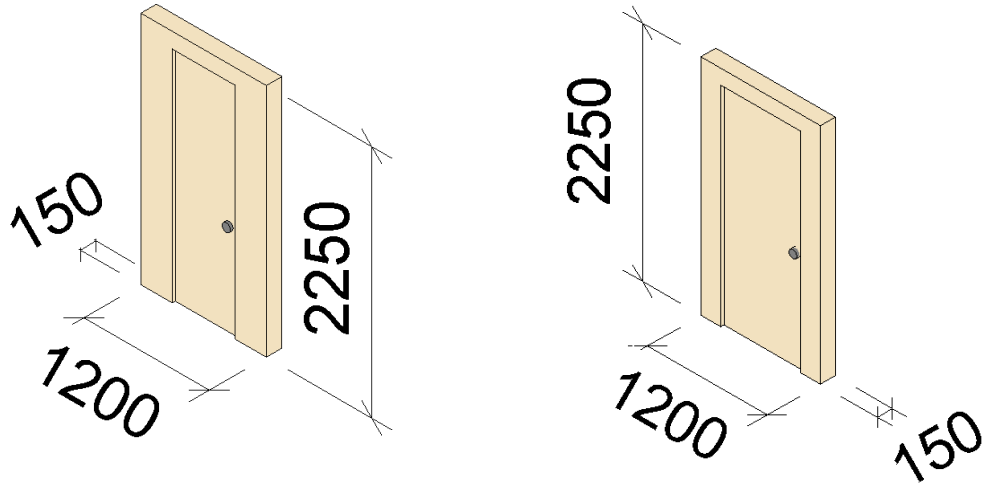


Fig.: Painel com porta de 2000mm x 600mm e painel com porta de 2000mm x 800mm.

PASSO 4

Foram desenhados os painéis restantes contendo aberturas, nomeadamente os painéis com janelas 800mm x 800mm, 800mm x 500mm e 1000mm x 1000mm.

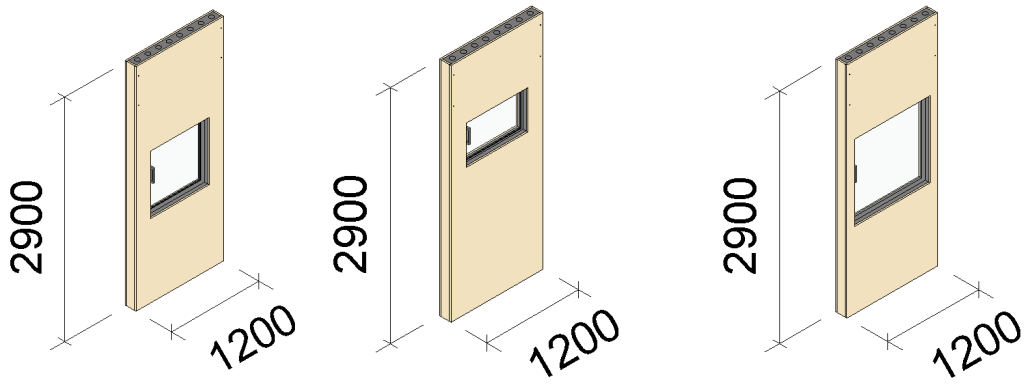


Fig.: Painel de janela de 800mm x 800mm, painel de janela de 800mm x 500mm e painel de janela de 1000mm x 1000mm.

PASSO 5

Foram desenhados no *Revit* chapas externas em alumínio para serem instaladas na face externa dos painéis, conformando assim a envoltória da edificação. Foi necessário desenhar para além de um painel inteiriço (que cobriria os blocos padrão unificados), também painéis que tivessem aberturas para receber os distintos tipos de portas e janelas.

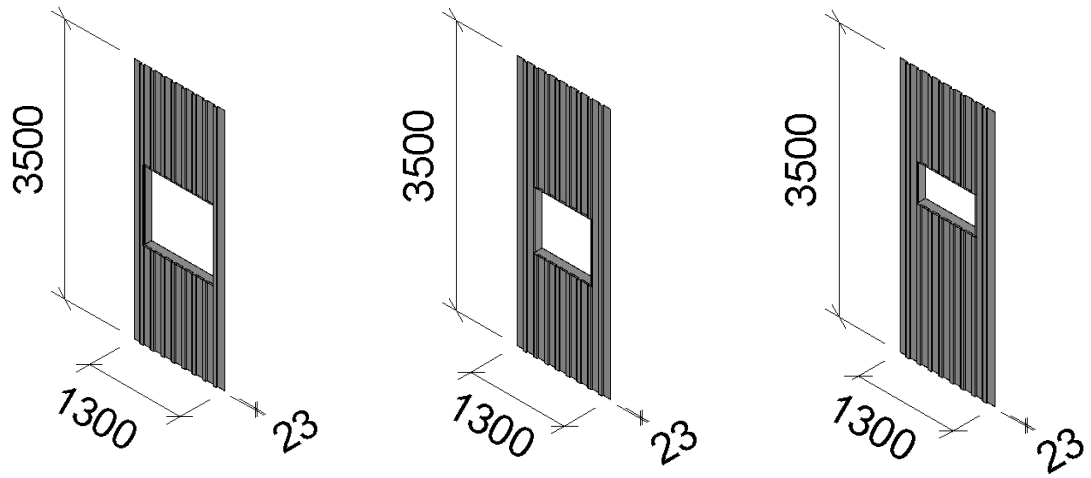


Fig.: Painel para janela de 1000mm x 1000mm, painel para janela de 800mm x 800mm e painel para janela de 500mm x 800mm.

PASSO 6

Almejava-se utilizar uma combinação de 18 unidades do bloco padrão para conformar a laje de piso de um módulo, mas foi optado por criar uma estratégia mais efetiva. Foi considerado que toda a área de piso poderia ser dividida em apenas 3 painéis, o que geraria mais estabilidade mecânica e geraria menos

pontes térmicas. Foi definido, portanto, a criação de uma unidade de 3800mm x 1200mm x 150mm (com um chanfro para encaixe nas vigas e pilares) e outra de 3800mm x 1200mm x 150mm (para ser disposta ao centro).

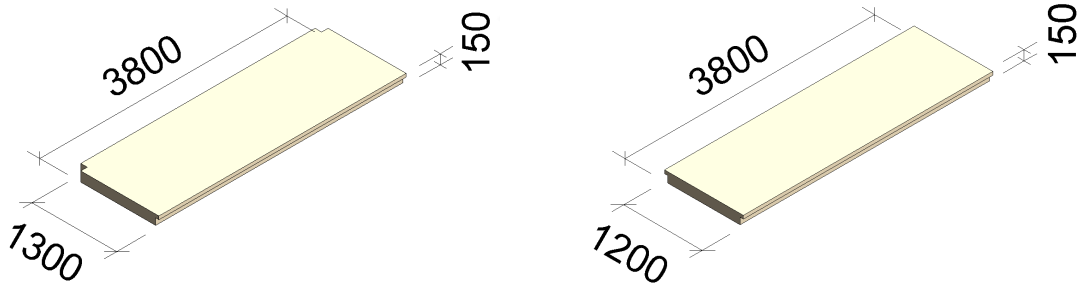


Fig.: Piso de canto e painel de centro.

Ademais, os painéis de pisos receberam em sua base espaço para também serem escoradas pelas vigas metálicas (3800mm x 100mm x 100mm), estas que se escoram nas vigas principais da edificação. Dessa maneira, a laje de piso atingiria a estabilidade necessária.

PASSO 7

Foram criados dois novos painéis: Parede de Vidro e Parede de Vidro com porta de 800mm. O intuito foi criar elementos que pudessem trazer maiores possibilidades de personalização. Ambos painéis tem 3600mm x 2950mm x 150mm.

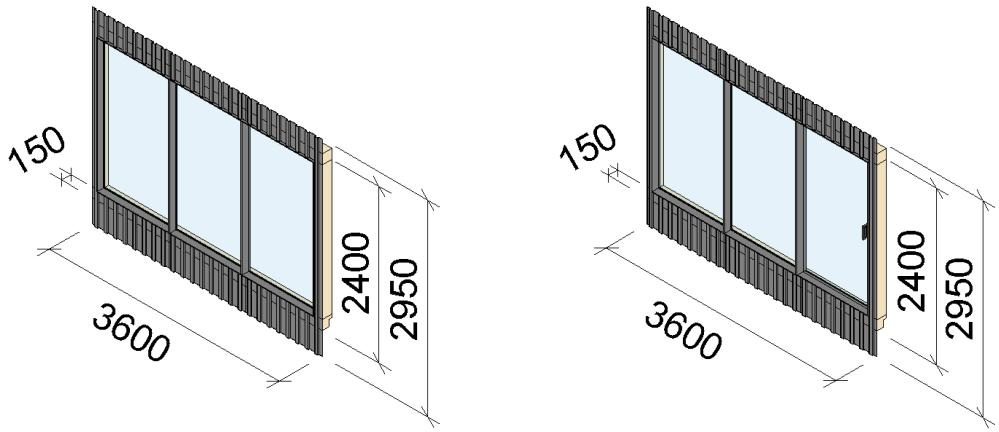


Fig.: Parede de vidro (com chapa externa anexada) e parede de vidro com porta de correr de 1000mm de largura (com chapa externa também anexada).

Posteriormente, foi pensado outra composição que agregaria valor à edificação: um *deck* frontal de 3600mm x 2400mm. Para sua constituição, foram aproveitados os blocos de piso de 3600mm x 2400mm x 150mm e a viga de 3600mm x 200mm x 200mm, restando apenas a criação de um pilar de *deck* de 500mm x 200mm x 200mm, uma viga de 2400mm x 200mm x 200mm e a criação de um painel de fechamento de 3600mm x 500mm x 100mm.

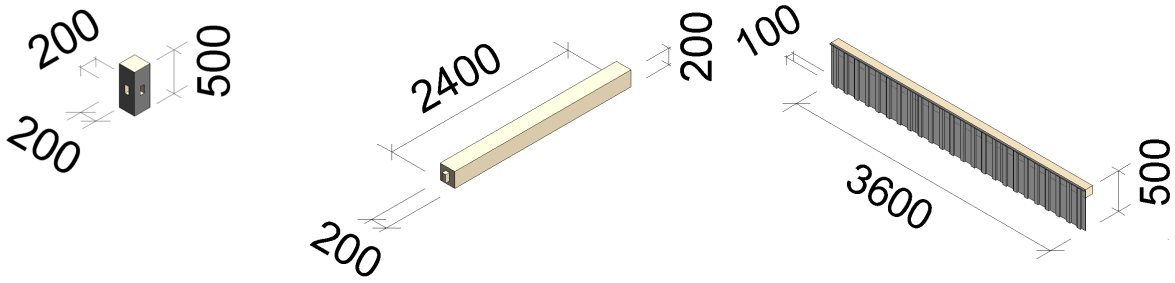


Fig.: Pilar de *deck*; Viga de *deck*; Painel de fechamento de *deck*.

Também foram desenhados no *Revit* um anteparo para recebimento dos painéis de 3000mm x 1200mm x 50mm e uma escada de 500mm x 1200mm x 900mm, esta que serviria como acesso principal à edificação.

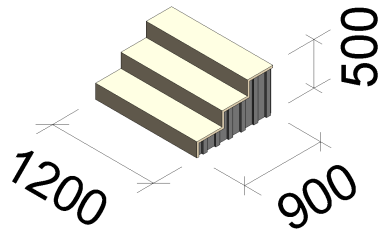


Fig.: Escada.

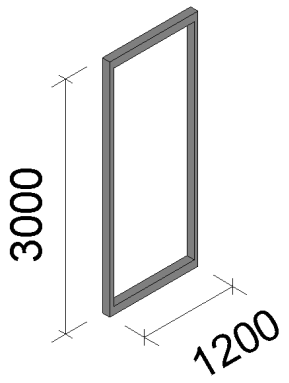


Fig.: Quadrícula de 3000mm x 1200mm x 100mm, fechamento de quina de 3000mm x 300mm x 300mm.

ETAPA III – ENTENDIMENTO DAS FUNCIONALIDADES DE SOFTWARE DE DESIGN PARAMÉTRICO E IMPORTAÇÃO DE ELEMENTOS

PASSO 1

Preliminarmente ao início dos trabalhos no *Grasshopper*, foi realizada a simulação de montagem de um módulo/compartimento. Realizou-se essa montagem dos elementos criados no *Revit* como forma de verificação dos encaixes e identificação de possíveis melhorias.

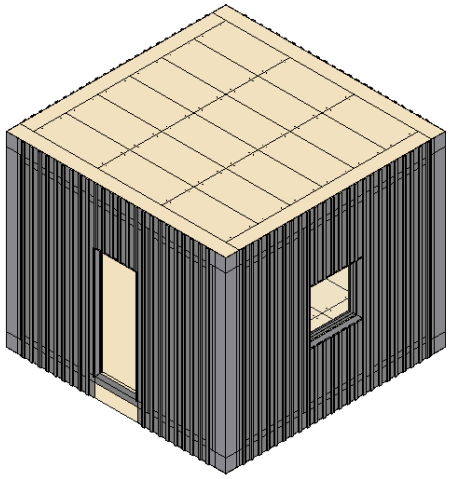


Fig.: Simulação de compartimento.

PASSO 2

Todos os componentes criados (com exceção dos componentes de *deck* e as paredes de vidro) foram inseridos em um só arquivo *Revit*, de forma que pudesse ser facilitada a integração destes componentes ao *Grasshopper*.

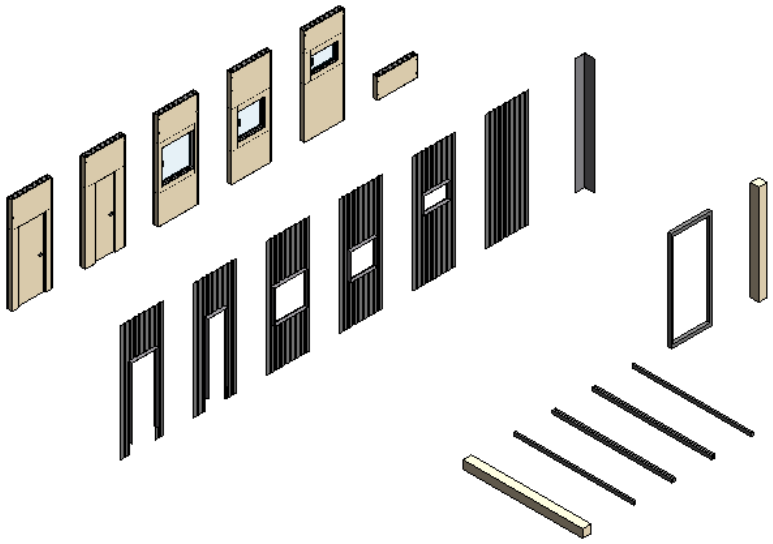


Fig.: Componentes.

Posteriormente, foi realizado o primeiro contacto com o *Grasshopper*. Utilizando uma função de importação de elementos (*Graphical Element*), os componentes previamente criados foram inseridos em um novo projeto no *Grasshopper*. Os componentes criados no *Revit* puderam ser listados e visualizados com sucesso.

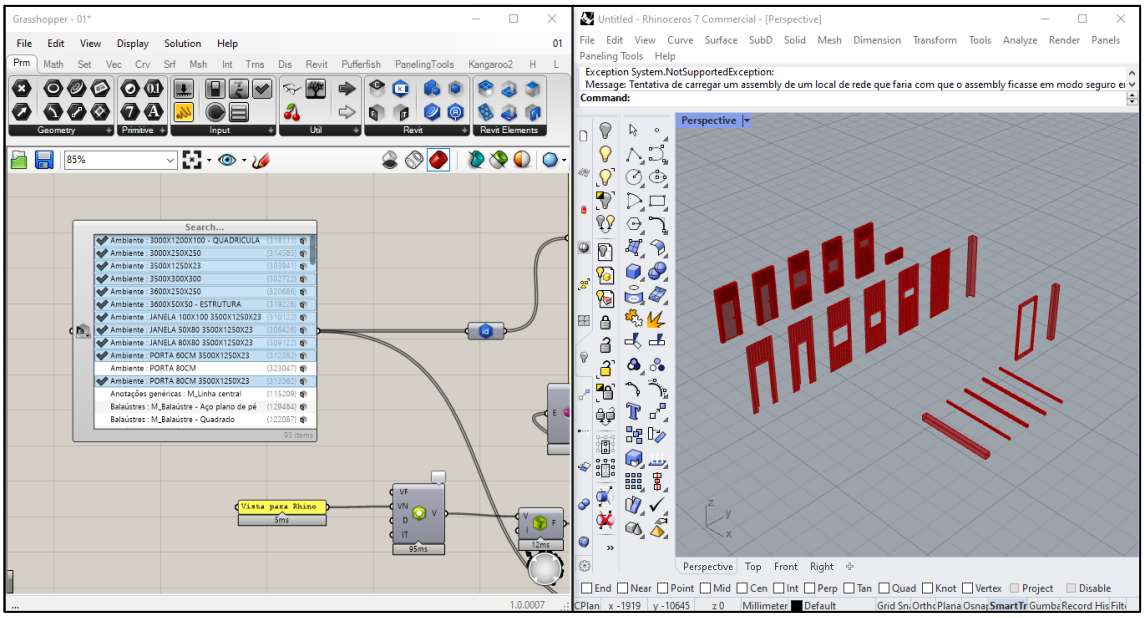


Fig.: Componentes importados para o *Grasshopper* (esquerda) e visualização dos mesmos no *Rhinoceros* (direita).

PASSO 3

Os componentes foram importados no *Grasshopper*. Através de 12 chaves seletoras criadas, sendo 3 para cada parede, os componentes puderam ser selecionados de acordo com a configuração que fosse mais conveniente, visto que foram conectados a funções de importação, cópia e movimentação ao longo de eixo (X e Y).

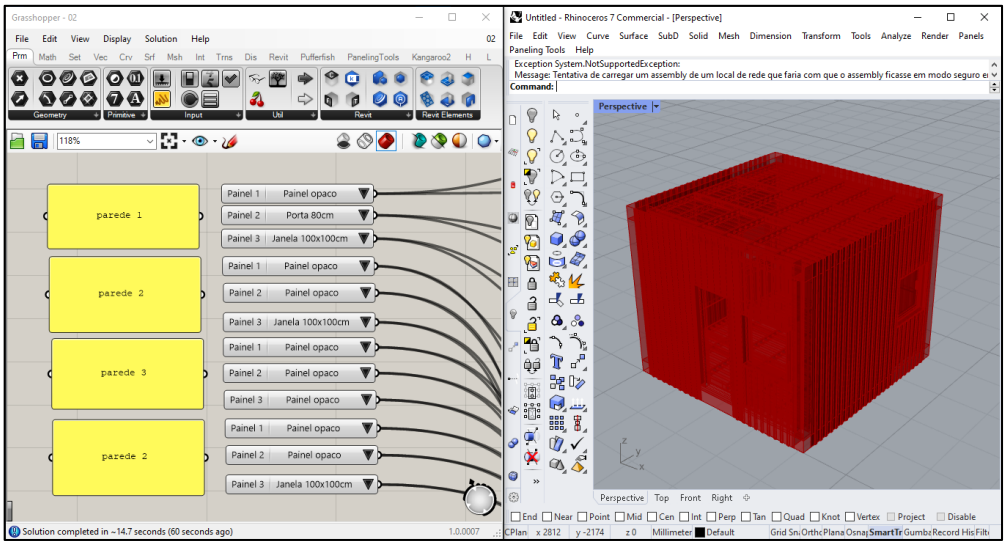


Fig.: Componentes agregados no *Grasshopper*.

PASSO 4

Novas diretrizes foram tomadas após uma sessão de orientação:

- Eliminar a ideia dos blocos que formam um painel de parede, visto que poderiam gerar pontes térmicas indesejadas e maior complicação no ato da montagem;
- Unificação do painel externo ao painel interno no projeto, de forma que sejam um componente único e permitam mais fácil uma montagem mais fácil onsite;
- Criar novas possibilidades de plantas para que o projeto atinja diferentes contextos;
- Manutenção do pé direito em 2400mm;
- Criação de Parede Hidráulica que sirva à cozinha e à instalação sanitária;
- Buscar perceber as condicionantes básicas para elaboração de telhado.

PASSO 5

Foi desenhado um tabuleiro modular contendo quadrículas no *Grasshopper*. Esperou-se que as quadrículas (estas compostas por quadrados de 3M de dimensão em cada uma de suas faces), pudessem ajudar na compreensão da evolução da casa, seja no espaço que ocupa em planta, seja na quantidade de possibilidades que cada tipologia poderia gerar.

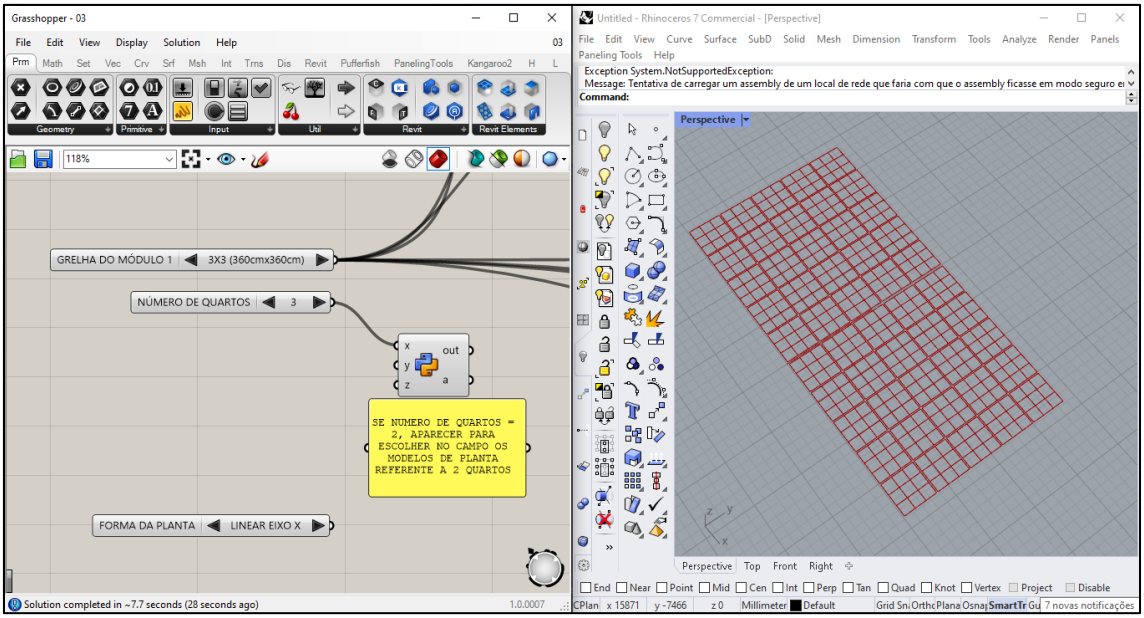


Fig.: Malha principal contendo 5 x 10 módulos de 3M x 3M cada.

PASSO 6

Foi desenhado o painel opaco para parede, de 2250mm x 1200mm.

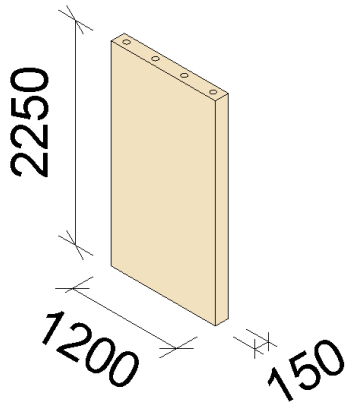


Fig.: Novo painel de 2250mm x 1200mm.

PASSO 7

Foram agregadas placas externas aos painéis. Tal estratégia, além de ter enfoque em facilitar o transporte e montagem, também facilitou a própria exploração generativa, tendo se em vista reduziu a quantidade de elementos a serem importados.

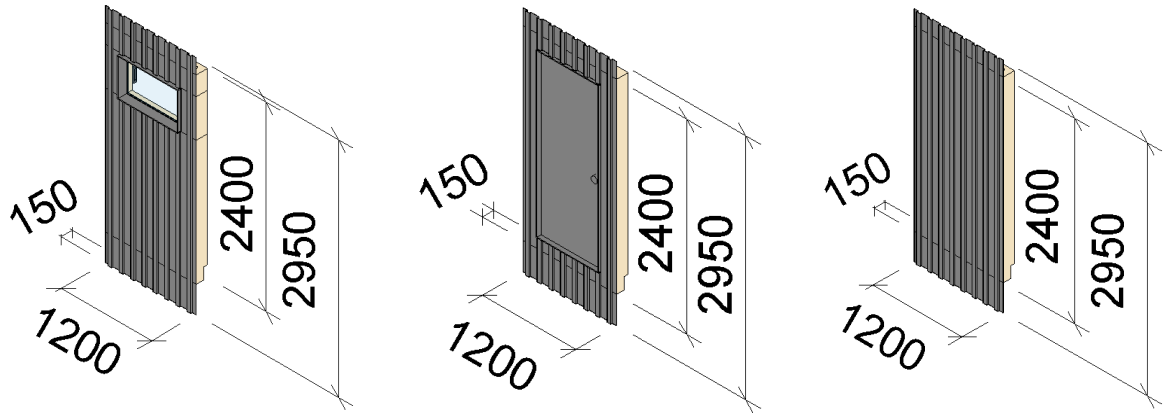


Fig.: Janela de 500mm x 800mm com painel externo, porta de 2000mm x 800mm com painel externo e painel opaco de 2950mm x 1200mm com painel externo.

Em seguida, foram criados novos componentes, a Parede Hidráulica (2400mm x 2400mm), a laje de piso (3700mm x 1200mm x 100mm) e os módulos de telhado.

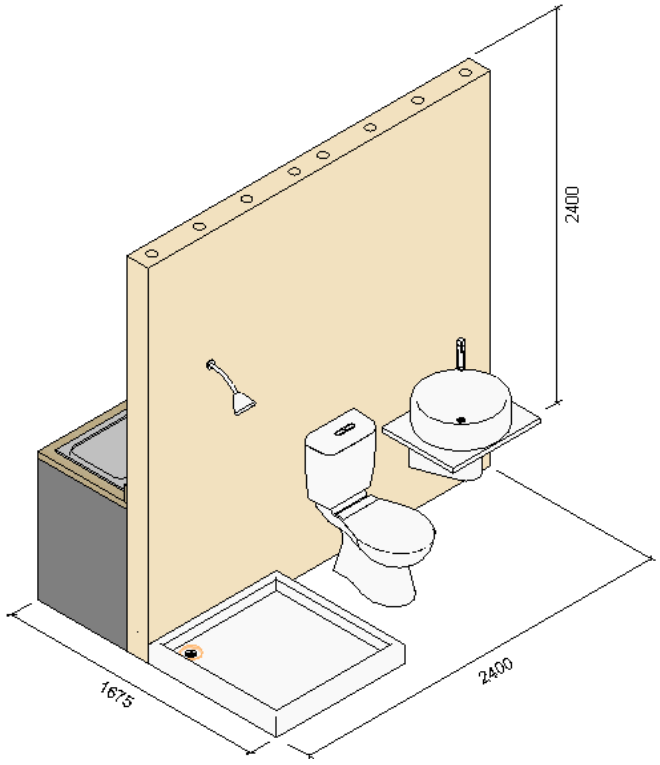


Fig.: Parede Hidráulica.

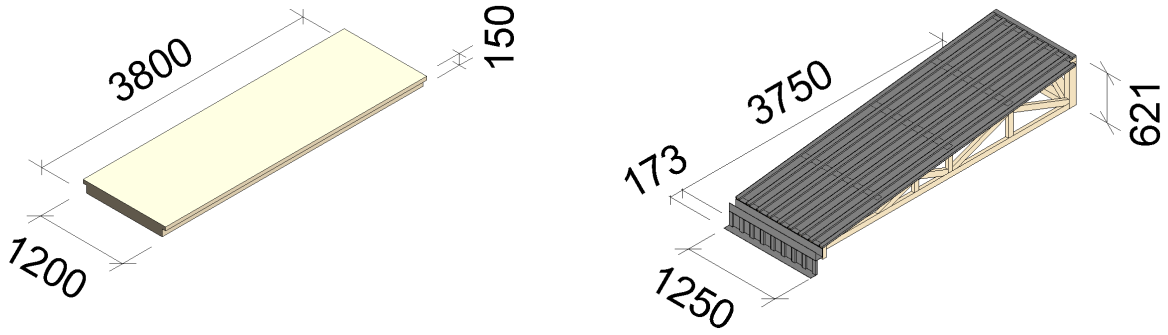


Fig.: Laje de piso e módulo telhado.

PASSO 8

A Parede Hidráulica passou por aprimoramentos, percebeu-se a baixa adesão de seus componentes e que mudanças deveriam ser feitas. Desta maneira, a Parede Hidráulica recebeu um novo nome (Módulo QB) e passou a ser uma combinação de três elementos: a parede previamente projetada, uma laje de piso de 3600mm x 1200mm e uma parede de fechamento de casa de banho. Tornou-se assim um módulo estável de 2550mm (altura) x 1200mm (largura) x 3600mm (comprimento), contendo também pontos para instalação de alça para içamento.

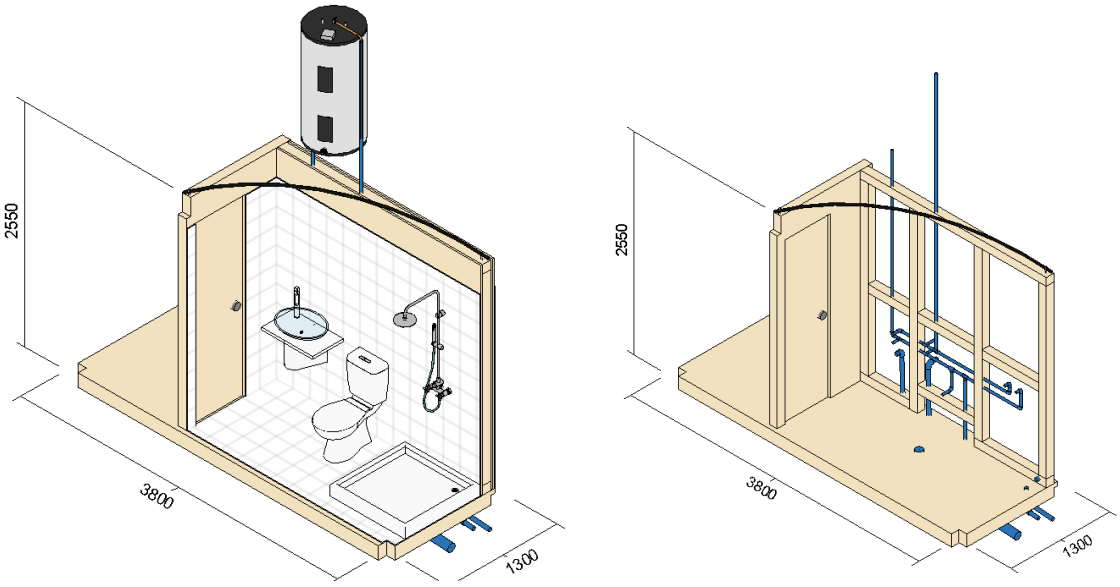


Fig.: Módulo QB e Módulo QB sem loiças e equipamentos.

Posteriormente, todos os painéis e componentes criados foram agregados a um novo módulo dentro do próprio *Revit*, no intuito de facilitar o processo de importação. Foi utilizada a estratégia de posicionar apenas um painel por parede, deixando para o *Grasshopper* a tarefa de copiar o painel e movimentá-lo para os espaços vazios (através da função *Move Geometry*). Posteriormente foi desenhado um novo painel: guarda corpo de 1000mm x 1200mm, que poderia vir a ser utilizado em varandas e alpendres.

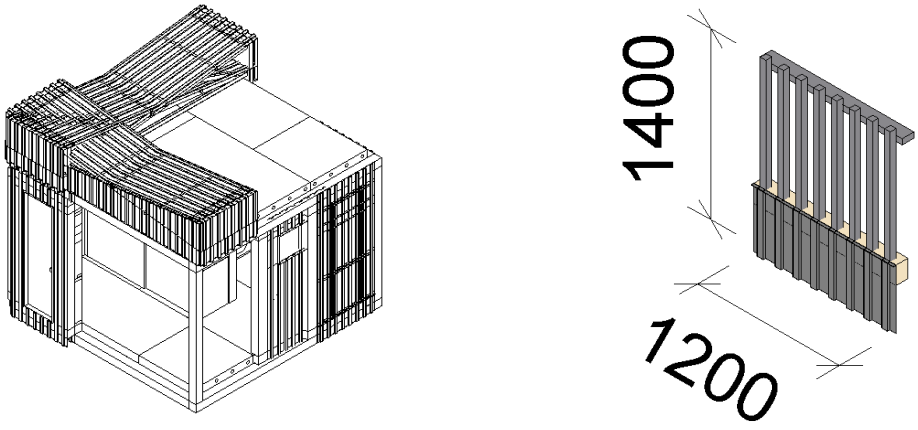


Fig.: Componentes agregados no *Revit* e painel guarda corpo.

PASSO 9

A fim de se desenhar as hipóteses de planta, foi percebido que a planta é, acima de tudo, uma combinação de módulos. Desta maneira, refletiu-se que ao se atribuir um código de referência para cada um dos módulos pertencentes a uma edificação, seria possível associar cada planta a uma combinação de códigos – o que ajudaria a diferenciá-las e consequentemente ajudaria nos processos de codificação que envolvem a linguagem *Python*. Ciente disso, condicionantes necessitaram de ser impostas devido a questões construtivas técnicas e a questões espaciais.

Após uma série de esboços, chegou-se à conclusão de que seria possível criar dentro da solução 42 plantas diferentes, número bastante superior ao que era inicialmente pretendido. Estas 42 plantas se distribuem nos seguintes grupos:

- 10 variantes de plantas da tipologia T1;
- 13 variantes de plantas da tipologia T2;
- 12 variantes de plantas da tipologia T3;
- 7 variantes de plantas da tipologia T4.

Desta maneira, foram definidas 42 plantas/combinações de módulos, respeitando o uso de cada módulo e o posicionamento no tabuleiro modular. Através de chaves seletoras que foram inseridas no Modelo Paramétrico, foi possível visualizar cada planta de acordo com a tipologia e o número da planta (o número corresponde a seu código dentro de uma tipologia específica).

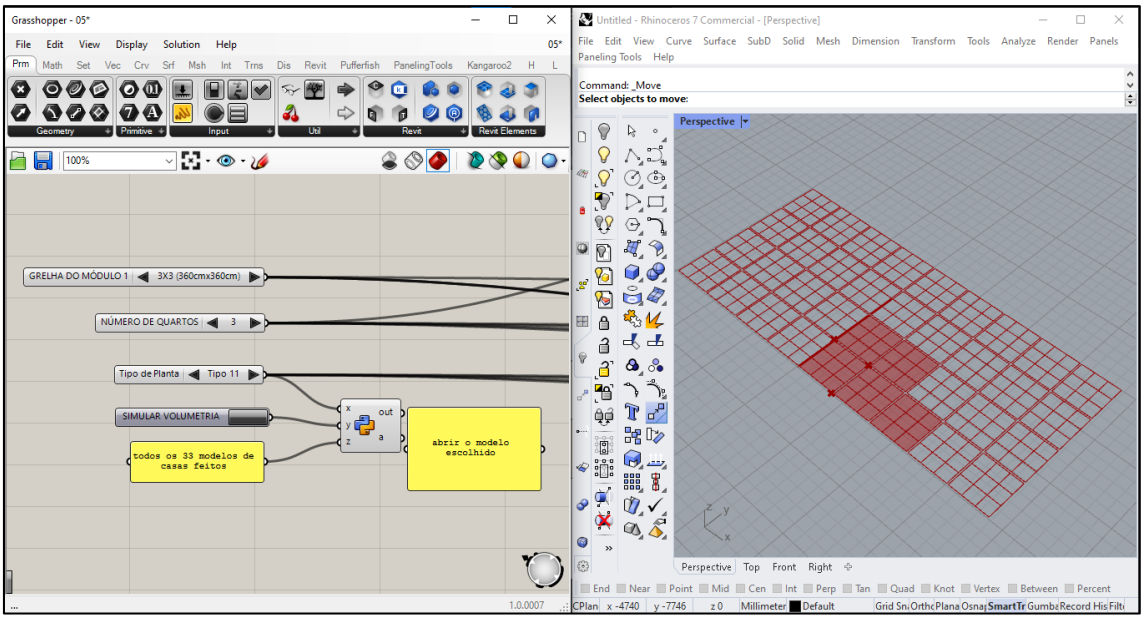


Fig.: Demonstração de uma das possibilidades (tipo 11) de 3 quartos.

PASSO 10

Foram feitas inserções de componentes no módulo exato onde deveria ocupar o módulo sala. Tal exploração foi de grande valia pois cruzou os dois produtos feitos até o momento (arquivos importados e tabuleiro modular), abrindo assim uma possibilidade futura para a modelagem de uma casa inteira baseada em uma planta específica.

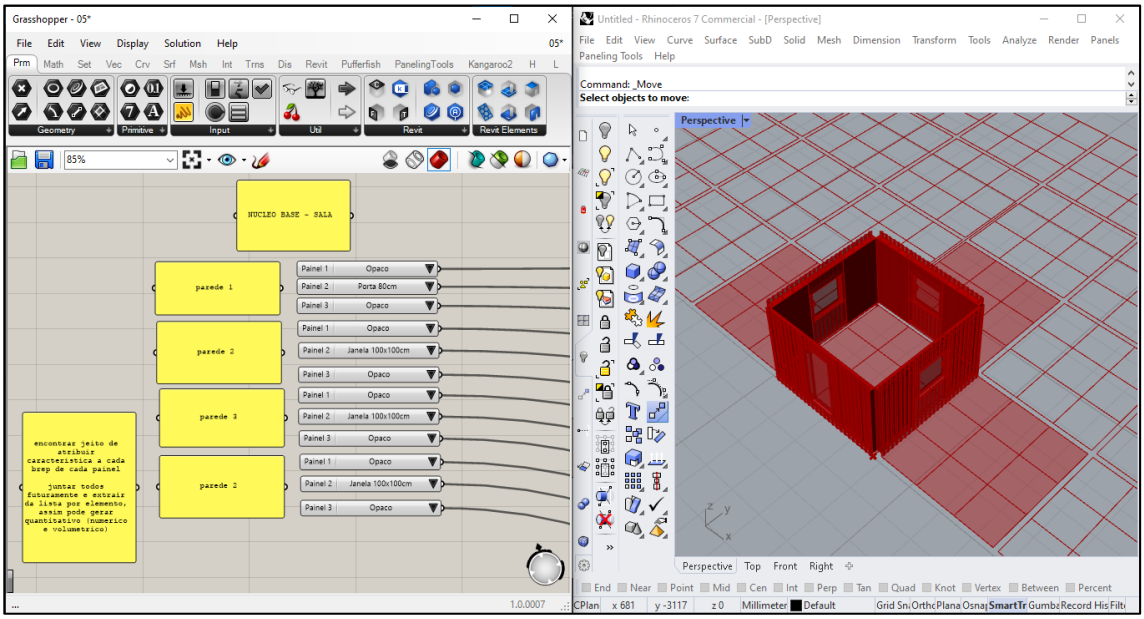


Fig.: Inserção de componentes em espaço de simulação de plantas.

PASSO 11

Através de uma função que realiza a cópia e movimentação de elementos (*Move Geometry*), o conteúdo do núcleo principal foi movimentado para outras quatro posições a fim de se simular como seria uma edificação de tipologia T4 (Módulo Sala + Módulo Hidráulico + quatro quartos). Foi uma estratégia tomada para se ter noção se que seria possível cumprir os objetivos do Caso de Estudo, restando futuramente criar condicionantes para cada tipo específico de planta.

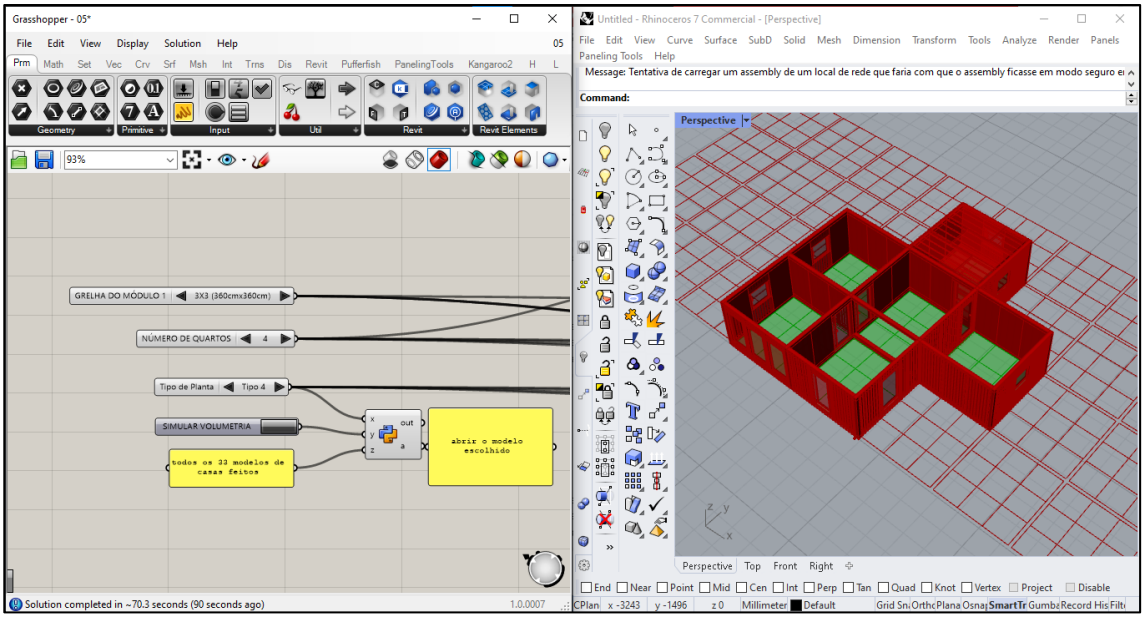


Fig.: Simulação de tipologia T4.

PASSO 12

Foram feitos aprimoramentos nos módulos dos telhados. Além de receberem uma melhor estruturação em madeira, também receberam placas de fechamento lateral esquerdo, fechamento lateral direito e fechamento traseiro. Dessa maneira, puderam ser feitas composições de módulos de telhados:

- Telhado sem fechamento;
- Telhado com fechamento traseiro;
- Telhado com fechamento esquerdo;
- Telhado com fechamento direito
- Telhado com fechamento esquerdo e direito;
- Telhado com fechamento esquerdo e traseiro
- Telhado com fechamento direito e traseiro;
- Telhado com fechamento esquerdo, direito e traseiro.

Tal estratégia de decomposição de telhado por fim se mostrou de grande valia, visto que os componentes criados foram de tamanhos ideais para transporte, além de poder se prever qual seria o quantitativo de elementos de telhado de para uma habitação inteira:

- Número de módulos * 3 + placas de fechamento que forem necessárias.

PASSO 13

Foi criada uma cadeia de funções para atribuir referências numéricas para cada uma das posições de módulos do tabuleiro modular. Estabeleceu-se que a trama completa poderia ter 4 posições por 7, totalizando assim 28 posições, ou seja, P1 à P28. Vislumbrou-se que se fosse realizada a codificação das plantas, interpretando que cada planta fosse uma combinação dessas 28 posições de módulo, assim se tornaria mais fácil a geração automática das 42 plantas.

Em seguida foi simulada a habitação T2 e "tipo "4", nos mesmos moldes da experimentação da habitação T4 e "tipo 3", realizada anteriormente.

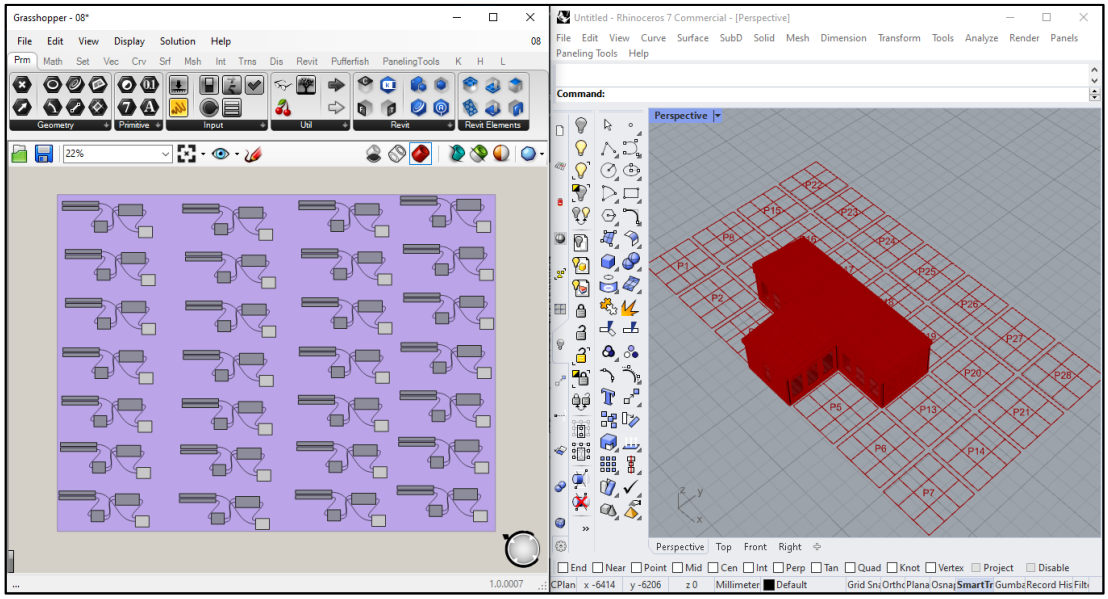


Fig.: Simulação de Tipologia T2 do tipo 4: ocupa os quadrantes P4, P10, P11 e P12.

PASSO 14

Foram agregados ao modelo principal do *Revit* uma série de móveis residenciais para que fosse possível visualizar como seria a versão final dos módulos, além de identificar possíveis melhorias no layout. Posteriormente os componentes de mobiliário foram importados no *Grasshopper* e movimentados até os sítios apropriados.

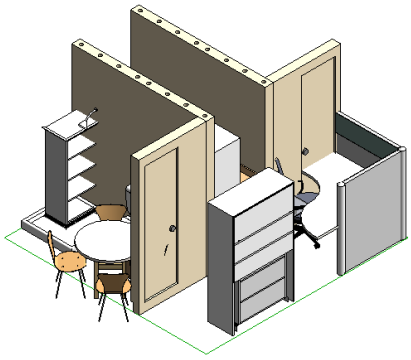


Fig. Mobiliário reunido no *Revit*.

Tal experimentação foi pertinente para se ter mais contacto com o *Grasshopper* e perceber mais sobre a relação entre módulos e mobiliário.

PASSO 15

Foi modelado no *Revit* um bloco sólido para a realização de simulações de volumetrias de habitações. O objetivo principal foi compreender como poderia vir a ser adições de módulos ao Núcleo-base e compreender quais condicionantes deveriam ser levadas em conta na elaboração de um código que definisse os eixos das cumeeiras e dos beirais de acordo com a conformação da planta da edificação.

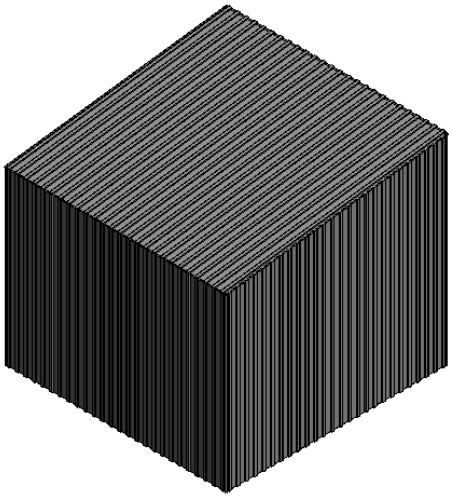


Fig.: Modelo de bloco.

O bloco foi importado dentro do *Grasshopper* e posteriormente colorido para melhor visualização no *Rhinoceros*. Inicialmente o trabalho seria a realização de uma planta de tipologia T4. Desta maneira, cada um dos blocos foi posicionado nos quadrantes respetivos da planta através de funções de cópia e

movimentação (*Move Geometry*) e rotação (*Rotate Geometry*). Posteriormente, optou-se por tentar criar uma série de condicionantes que possibilitariam a movimentação e a rotação automática dos blocos em função do desenho de planta, sempre em busca de gerar telhados para as 42 variantes de planta que sejam condizentes com os métodos de construção correntes.

O objetivo desta experimentação foi atingido. Foi criada uma estrutura que com apenas a introdução do número de quartos (tipologia) e o tipo da planta (variante) se tornou possível visualizar todas as volumetrias das edificações de forma instantânea. Ademais, tirou-se como positivo desta exploração o melhor entendimento das funcionalidades de rotação.

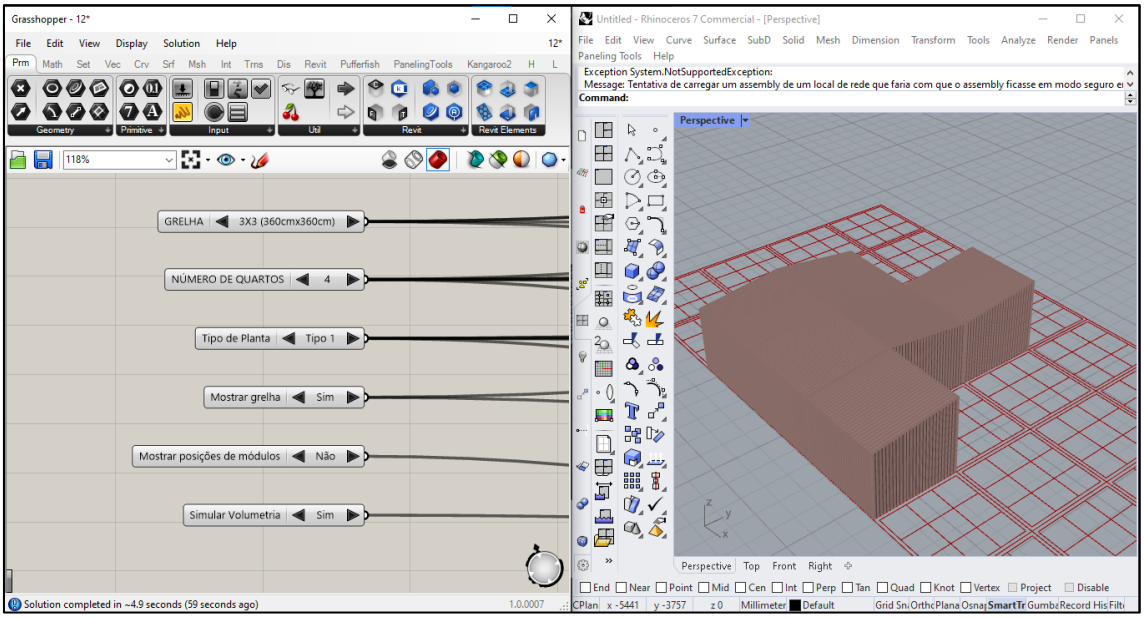


Fig.: Importação do bloco no *Grasshopper* e visualização do *Rhinoceros* de habitação de tipologia T4.

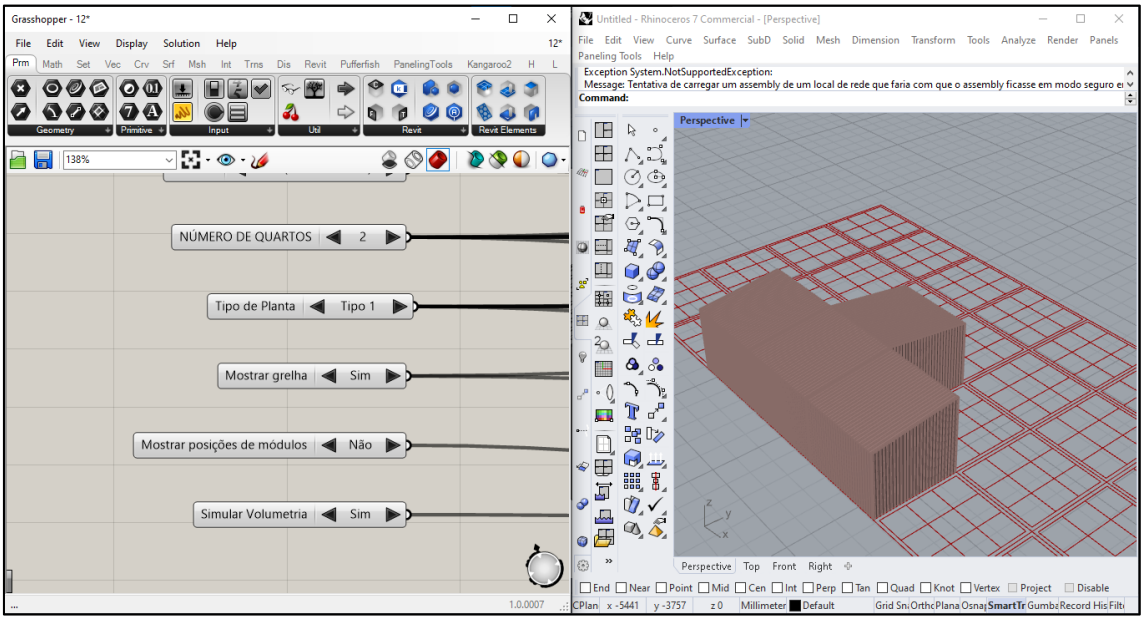


Fig.: Importação do bloco no *Grasshopper* e visualização do *Rhinoceros* de habitação de tipologia T2.

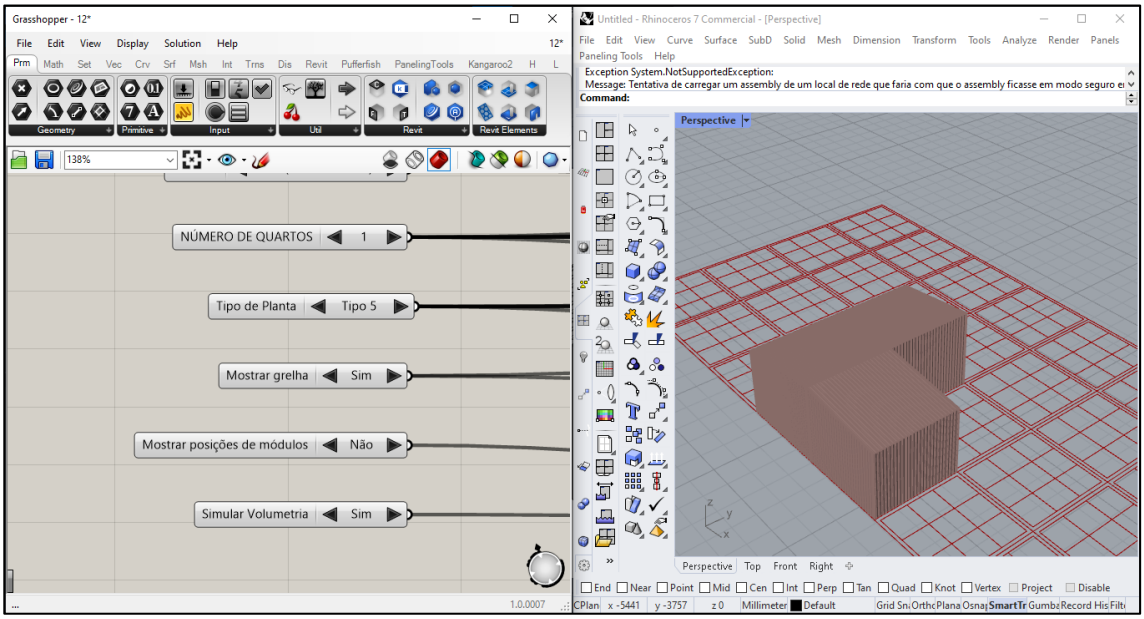


Fig.: Importação do bloco no *Grasshopper* e visualização do *Rhinoceros* de habitação de tipologia T1.

PASSO 16

Após uma sessão de orientação, novos objetivos foram estipulados:

- Focar em criar um Modelo Paramétrico que permita não apenas a simulação volumétrica rápida, mas que corresponda à habitação do modo mais fidedigno, apresentando todos seus componentes;
- Fazer com que este Modelo apresente, após a geração automática, possibilidade posterior de alterar os painéis para outros (por exemplo, possibilidade de aumentar as aberturas);
- Utilizar dentro deste Modelo uma série de condicionantes que faça com que não hajam duplicações em situações onde dois módulos distintos dividem paredes, e que em casos específicos gere portas de forma automática para que seja possível percorrer de um módulo para outro;
- Criar a funcionalidade de exibição de uma lista automática contendo todos os componentes utilizados, no intuito de conectar o projeto com o setor produtivo;
- Utilizar o sistema CLT por defeito para os painéis e estrutura.

Posteriormente à sessão de orientação, entendeu-se que a estruturação das cadeias de funções viria a ser um produto reaproveitável. Ademais, a experimentação das ferramentas nativas do *Grasshopper*, o entendimento das lógicas inerentes ao desenvolvimento e a criação de um fluxo de trabalho envolvendo os *softwares Revit* e *Rhinoceros + Grasshopper* foram ganhos de grande valia.

ETAPA IV – PRODUÇÃO DE MODELO PARAMÉTRICO

PASSO 1

A priori, tentou-se perceber o que poderia ser aproveitado nas cadeias de funções que poderiam ajudar na montagem do Modelo. Viu-se como interessante usar parte da estrutura produzida para gerar volumetrias. Também foi visto como pertinente a utilização de parte da estrutura das cadeias feitas para

montar a habitação de tipologia T4 e tipo “3”, visto que continha uma organização conveniente para criar uma funcionalidade de mudança de painéis dos módulos.

Nesta estrutura haviam exatamente 6 grupos de chaves seletoras, que poderiam ser associados ao limite máximo de tipologia trabalhado pelo Modelo Paramétrico (T4, que corresponde a 6 compartimentos). Desta maneira, estabeleceu-se como caminho para criar o mecanismo generativo o reaproveitamento desta estrutura e a criação de um código em função *GHPython* com condicionantes que permitissem trocar os painéis externos dos módulos.

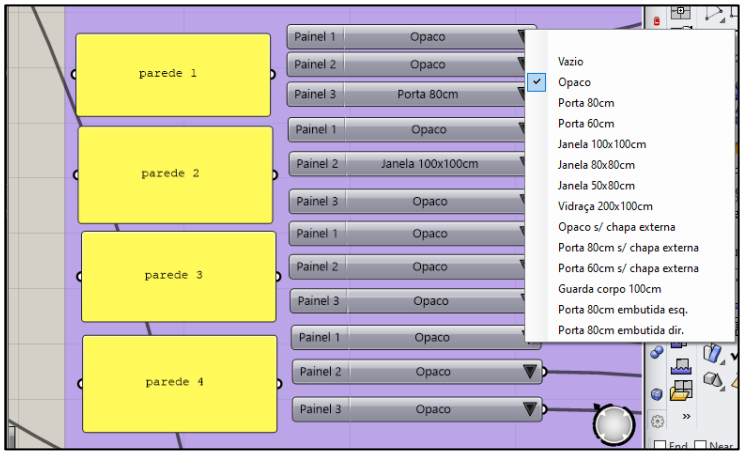


Fig.: Chaves seletoras do primeiro grupo (Módulo Sala) e possibilidades de escolha de uma destas chaves seletoras.

PASSO 2

Foi criado um código de condicionantes dentro de outra função *GHPython*, este que relacionou cada posição do tabuleiro modular (quadrantes que vão de 1 a 28) a um código estabelecido para os compartimentos:

- ns = Módulo Sala;
- nm = Módulo Hidráulico;
- q1 = quarto 1;
- q2 = quarto 2;
- q3 = quarto 3;
- q4 = quarto 4.

Na planta de tipologia T4 e planta “tipo 1”, por exemplo, o “ns” corresponde à posição 4 do tabuleiro, o “nm” corresponde à posição 11, o “q1” à posição 3, o “q2” à posição 5, o “q3” à posição 10 e o “q4” à posição 18. Este mapeamento ajudou a codificar o desenho das plantas, visto que permitiria a criação das plantas apenas com a inserção da tipologia e o tipo de planta. Foi este então um importante caminho para a criação das funcionalidades de geração automática de projetos.

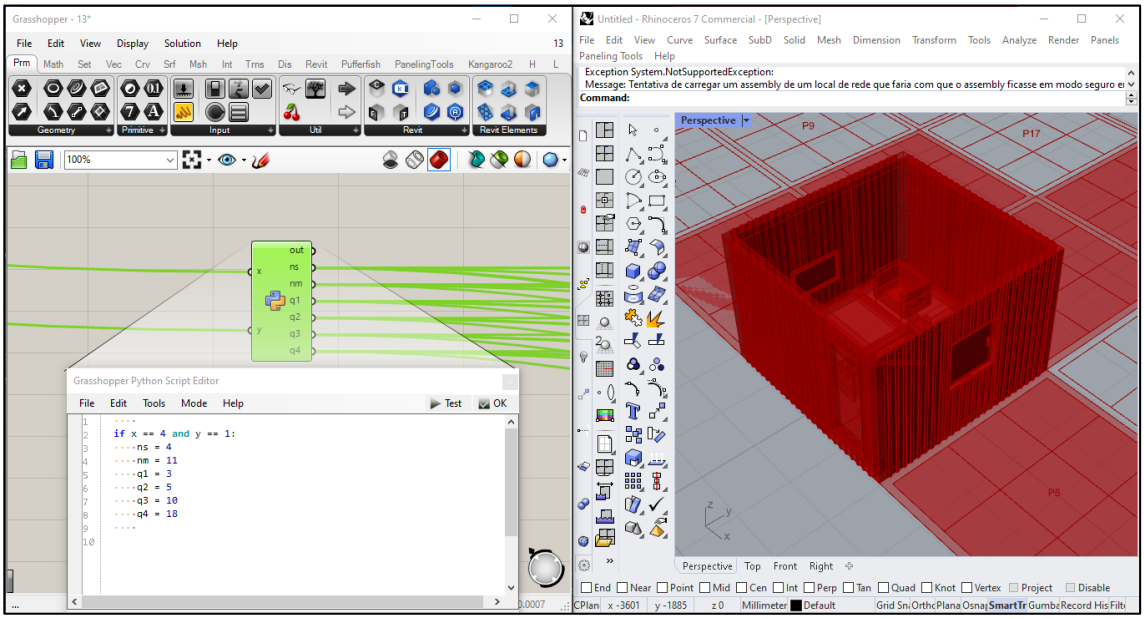


Fig.: Código de condicionantes dentro da função *GHPython.*

PASSO 3

Quando todas as plantas foram associadas um conjunto de posições específicas, pôde-se criar outras condicionantes que ajudaram a definir a combinação de painéis de cada uma das paredes. Isso foi possível devido ao facto de que na estrutura aproveitada da experimentação cada parede já estava dividida em 3 partes (pNp1, pNp2 e pNp3), sendo que cada um destas partes poderia ser associado a um tipo de painel.

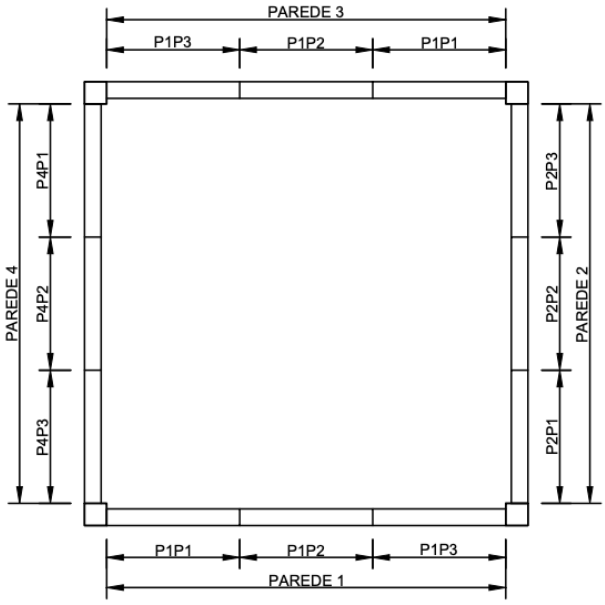


Fig.: Esquema de paredes e posições de painéis.

Ao final do desenvolvimento, viu-se que a estrutura para criar a funcionalidade de alteração de painéis não seria de grande complexidade, mas a estrutura para criar a funcionalidade de geração automática seria. A boa notícia foi a perceção de que o objeto principal do Caso de Estudo seria exequível.

PASSO 4

Foi continuado o trabalho de criação de condicionantes para a geração automática de projetos. Uma reinterpretação foi feita baseada em aspetos construtivos e as possibilidades do software, até que as seguintes condicionantes foram estabelecidas:

- O Módulo Sala sempre deve ser a entrada da habitação;
- O Módulo Sala sempre deve dividir uma face com o Módulo Hidráulico;
- Os quartos adjacentes sempre devem dividir uma face com o Módulo Hidráulico ou o Módulo Sala.

Ciente destas condicionantes evolutivas, a estratégia tomada foi a seguinte:

i. Inicialmente seriam definidos a tipologia e o tipo de planta. Estas informações iriam à uma função *GHPython* que retornaria à posição dos módulos na edificação. Esta função já estava criada;

ii. Todos os códigos das posições dos módulos seriam levados a uma função *GHPython*, com um código que associa o conjunto de posições de módulos a combinações de painéis. Posteriormente, cada módulo receberia os painéis (3 painéis por parede, ou seja, cada módulo tem 12 painéis) baseada na presença (ou não presença) de outros módulos próximos.

Para que fossem gerados o número suficiente de configurações, todas as 42 plantas deveriam ser estudadas, buscando-se perceber quais módulos tangenciavam outros e onde as aberturas externas deveriam estar posicionadas.

Dessa maneira, ao longo do desenvolvimento da função *GHPython*, um ponto foi percebido: devido ao facto de o Módulo Sala e o Módulo Hidráulico sempre estarem conectados, entendeu-se que os dois não teriam parede no alinhamento que dividem, conformando um conceito *open space*, o que tenderia a facilitar o processo. Neste momento o trabalho restringiu-se a apenas à elaboração das configurações de painéis de um dos seis módulos: o grupo referente ao Módulo Sala.

PASSO 5

Ao passo que as possibilidades de painéis do Módulo Sala foram estudadas de acordo com as 42 plantas, observou-se que as plantas poderiam ser separadas em dois grupos, o que tenderia a facilitar a racionalização: o primeiro grupo compunha plantas onde o Núcleo-base era disposto ao longo do eixo Y do tabuleiro modular, o segundo grupo compunha plantas onde o Núcleo-base Hidráulico era disposto ao longo do eixo X do tabuleiro.

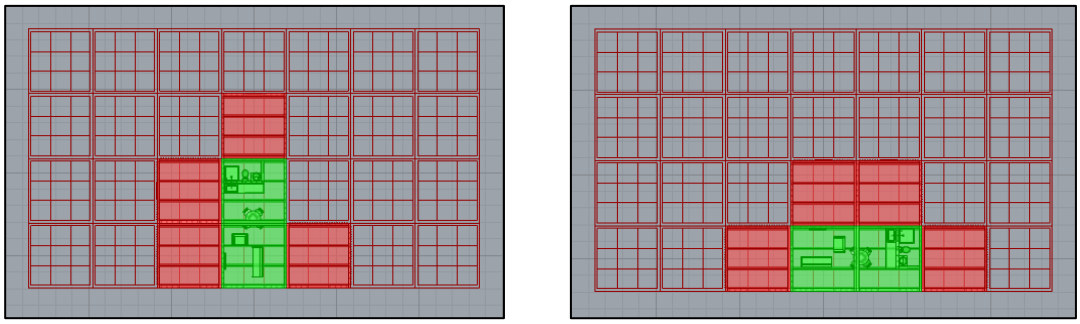


Fig.: Planta do grupo 1 com núcleo base em verde e planta do grupo 2 com núcleo base em verde.

Com estas novas reflexões, o trabalho foi continuado e as configurações do Módulo Sala foram findadas.

PASSO 6

Foi necessário planear a inserção dos módulos de telhado. A priori, as seguintes condicionantes foram estabelecidas:

- Cada módulo deve recebe três módulos padronizados de telhado;
- Nas plantas do grupo 1, a cumeeira do telhado deve ser disposta na parede que divide o Núcleo-base e o lado que possuir maior número de quartos adjacentes;
- Nas plantas do grupo 2, a cumeeira deve ser disposta na fachada traseira do Núcleo-base, de forma que o beiral do Núcleo-base seja na fachada principal da edificação;
- Os telhados tem a possibilidade de receber 3 tipos de fechamento: lateral esquerdo, lateral direito e traseiro. Estes são instalados em casos onde não haja encontro de módulos.

Definiu-se que os módulos deveriam importados através da mesma lógica para qualquer componente, e que deveriam ser rotacionados de acordo com as condicionantes estabelecidas acima. Dessa maneira, foi feita a codificação das posições e rotações dos telhados.

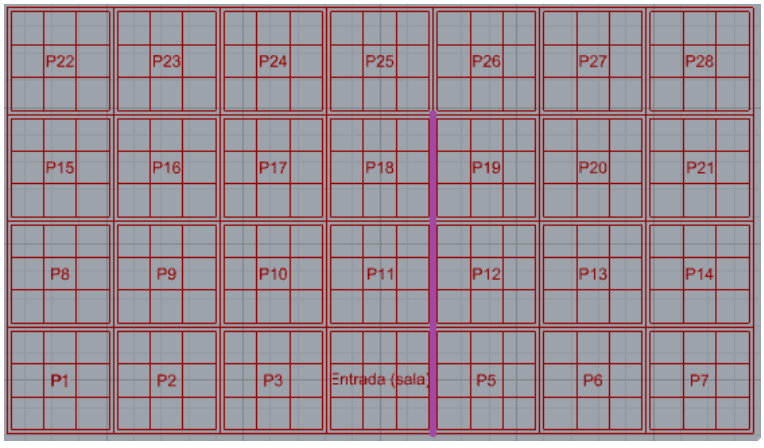


Fig.: Posição da cumeeira nas plantas do grupo 1.

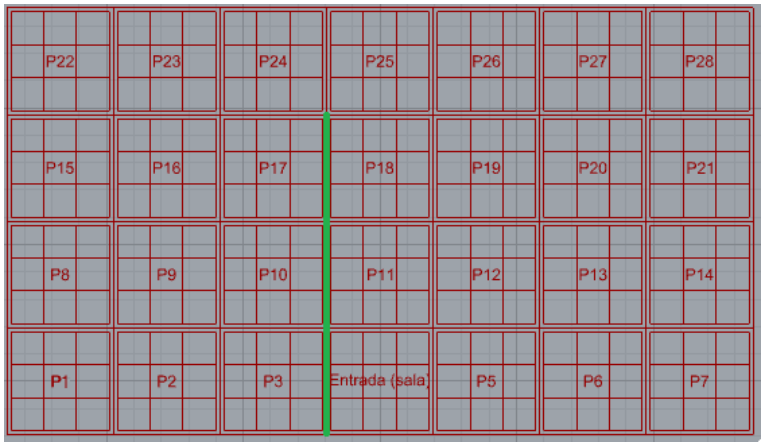


Fig.: Posição da cumeeira nas plantas do grupo 1.

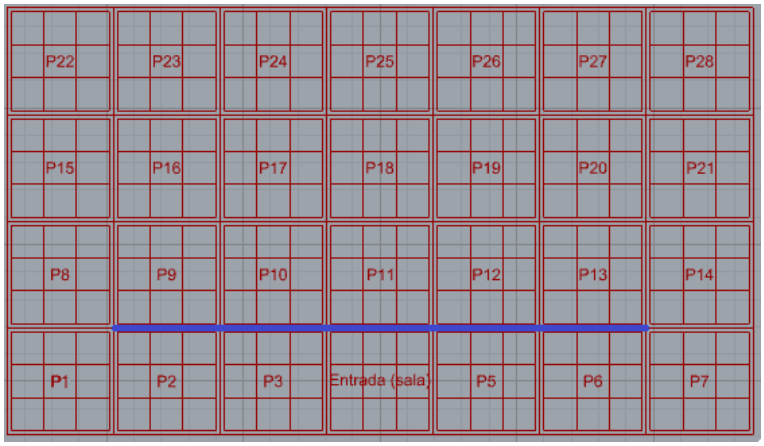


Fig.: Posição da cumeeira nas plantas do grupo 2.

PASSO 7

Ao passo que a função para posicionamento e rotação dos módulos de telhados estava finalizada, foi iniciada a elaboração da codificação para a atribuição dos painéis de fechamento dos telhados. Chegou-se à conclusão de que nesta codificação a interpretação dos telhados não deveria ser apenas pelo grupo da qual a habitação que faz parte (1 ou 2), mas também em deveriam ser organizados de acordo com a linha e coluna do tabuleiro modular.

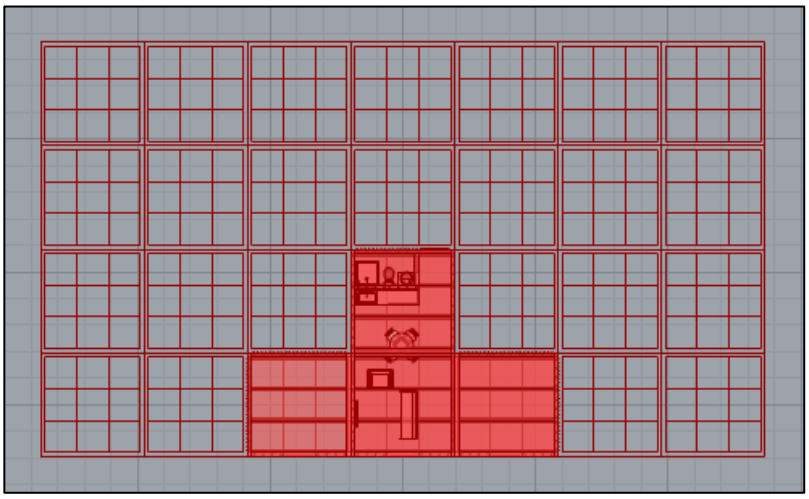


Fig.: Planta de tipologia T2, onde o Módulo Sala se posiciona na coluna 4 e linha 4, o Módulo Hidráulico se posiciona na coluna 4 e linha 3, o quarto 1 se posiciona na coluna 3 e linha 4 e o quarto 2 se posiciona na coluna 5 e linha 4.

O trabalho se iniciou com a geração de condicionantes para gerar os fechamentos laterais dos telhados dos módulos das plantas do grupo 2. Posteriormente foram agregadas as condicionantes para gerar os fechamentos traseiros, e por fim toda a estruturação deste código foi aplicada nas plantas do grupo 1.

PASSO 8

Em seguida, foi necessário criar um código para a realização da rotação dos telhados e seus fechamentos. Foi disposto dentro do *Grasshopper* um modelo padrão de telhado sobre todos os módulos. Por defeito, esse modelo tinha o beiral direcionado para a face sul (parede 1) do módulo. Dessa maneira, foi criada uma função *GHPython* que recebia as posições de cada módulo no tabuleiro modular e continha internamente as opções (em graus) de rotação do telhado. Assim sendo, foi escrito um código que interpretou o desenho da planta a partir destas posições dos módulos e que direcionou como *output* qual deveria ser rotação específica para cada um dos telhados sobre os módulos.

As opções de rotação definidas foram:

- Quando o beiral aponta para sul, então o telhado padrão rotaciona 0 graus;
- Quando o beiral aponta para leste (parede 2), então o telhado padrão rotaciona 90 graus;
- Quando o beiral aponta para norte (parede 3), então o telhado padrão rotaciona 180 graus;
- Quando o beiral aponta para oeste (parede 4), então o telhado padrão rotaciona 270 graus.

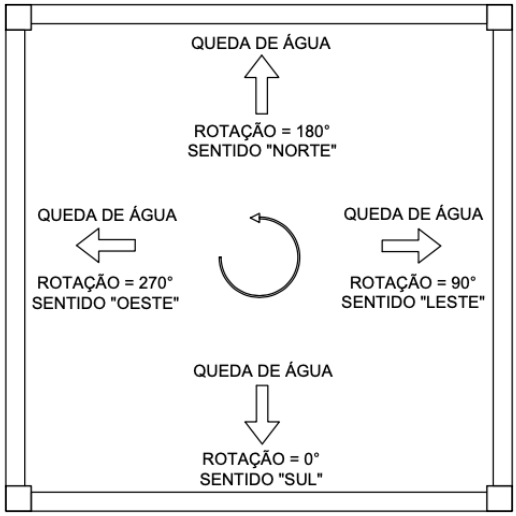


Fig.: Sentido de queda de água e respetivas rotações.

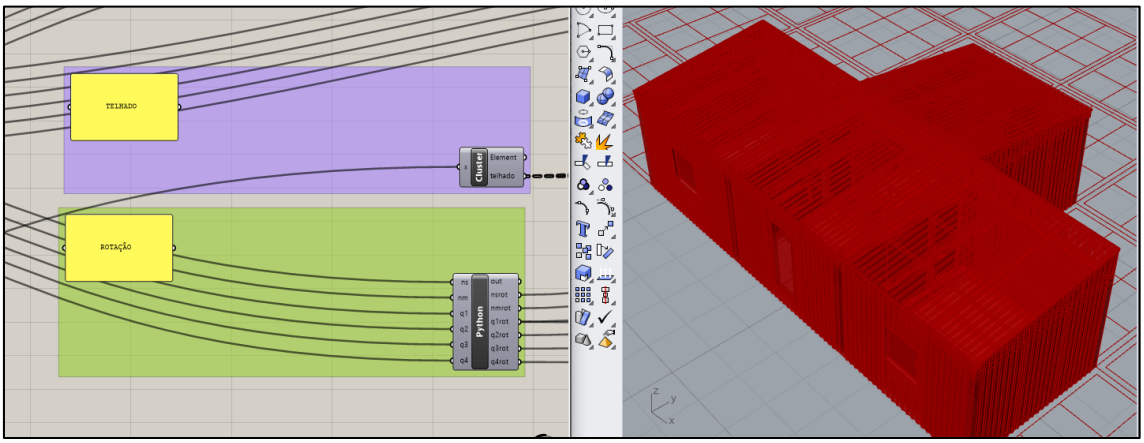


Fig.: Funções de importação de telhado e rotação.

Deu-se por encerrada a exploração generativa no que se refere à criação de plantas e a configuração dos módulos e seus elementos, restando como próximas tarefas a criação de uma lista final que pudesse agregar todos os componentes de determinada habitação, o desenvolvimento do *deck* frontal e a correção de eventuais erros.

PASSO 9

Nesta reta final de desenvolvimento do Modelo Paramétrico, foi focada inicialmente a cadeia de funções para listar e contabilizar os elementos de telhado. Entendeu-se que o desenvolvimento desta tarefa ajudaria futuramente na criação da uma lista geral, contendo todos os elementos do projeto gerado.

Os elementos foram importados através da função *Graphical Element*. Posteriormente, foram ligadas à função *Element Name*, que traz as informações de nome e categoria do elemento (são atribuídas no *Revit*). Desta maneira, estas informações foram direcionadas à uma cópia da função *GHPython* criada anteriormente para fazer a geração dos telhados. Essa função, em vez de fazer composições dos elementos geométricos dos telhados, fez a composição dos nomes dos elementos, o que possibilitou saber quais elementos estão presentes em cada diferente composição. Após criar essa estratégia para os

módulos de telhado, foram criadas mais uma cadeia para os fechamentos laterais e outra para os fechamentos traseiros.

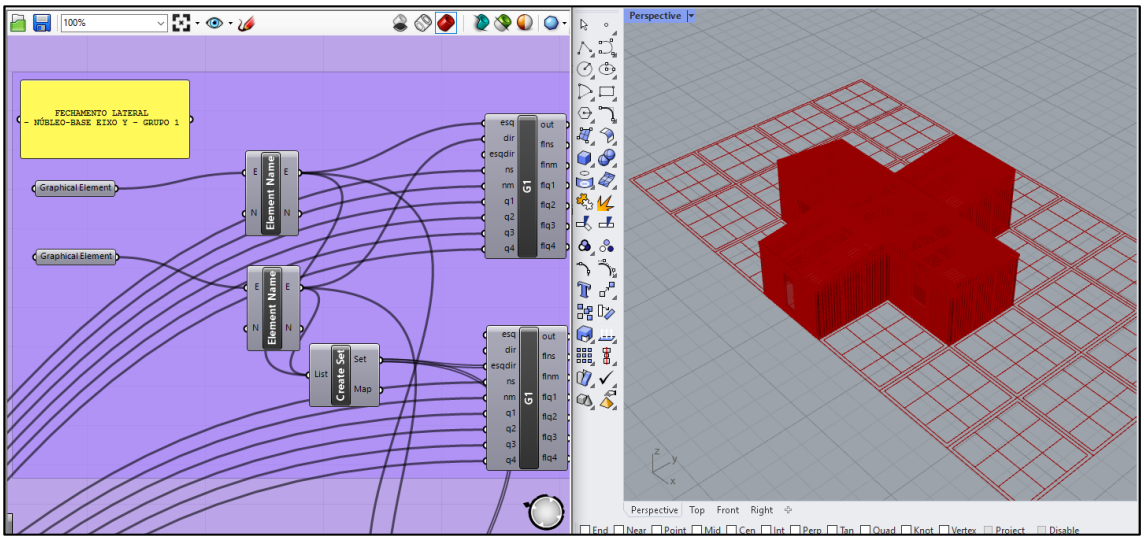


Fig.: Cadeia de funções para contagem de elementos de telhados.

Todas as informações provenientes dessas cadeias foram agregadas em uma função voltada a somar dados (*Merge*). Posteriormente, foram direcionados a duas funções: *Member Index* (coleta o nome e o número de referência dos elementos na lista) e *Create Set* (soma os elementos de nome igual). Os dados foram novamente reunidos através da função *Merge* e finalmente direcionados à função *Panel*, onde foi possível visualizar a contabilização dos elementos dos telhados.

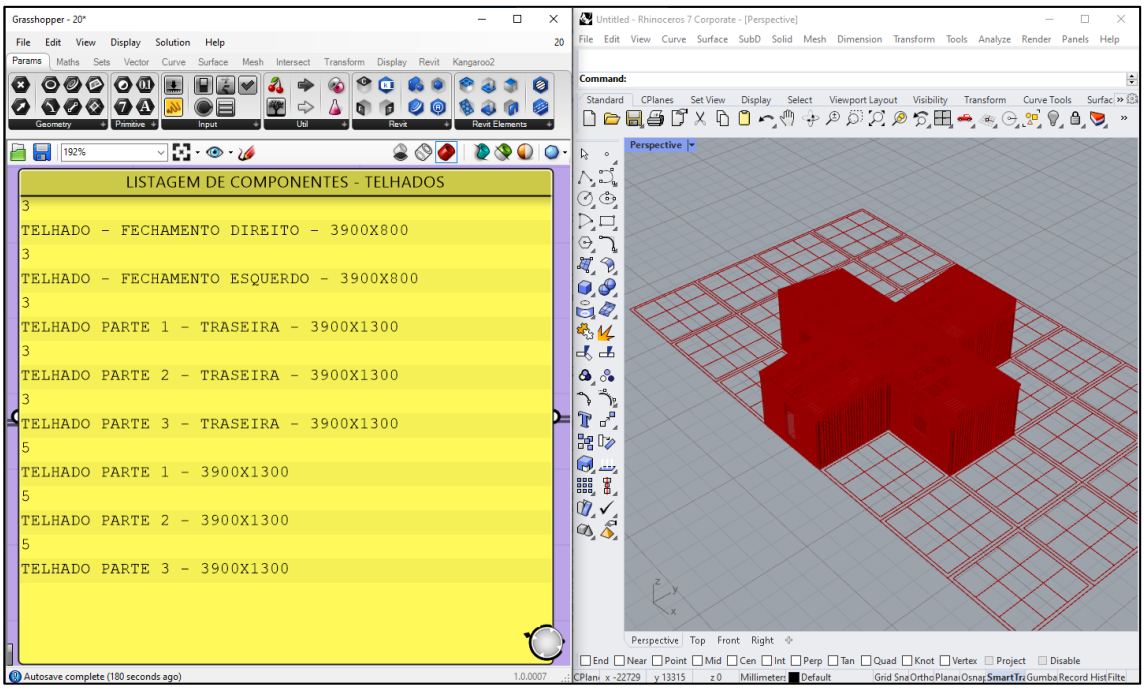


Fig.: Função *Panel* com contabilização de todos os elementos de telhado de habitação de tipologia T3.

PASSO 10

Nesse momento se percebeu que por mais que o método de geração de plantas apresentasse funcional, ainda não estava corretamente alinhado a um dos preceitos da construção evolutiva, nomeadamente o crescimento de uma construção através da adição de compartimentos. Desta maneira, buscou-se fazer uma atualização no gerador de habitação, este que faria com que construções pudessem ser projetadas e aumentadas módulo a módulo.

Inicialmente, foram montadas 4 chaves seletoras para se realizar a evolução da habitação, sendo que cada uma delas representa uma das 4 tipologias. Neste esquema, se considerou que deveria ser projetado o Núcleo-base ocupando apenas as posições P4 e P11. Com esta definição, os quartos poderiam ocupar as posições P3, P5, P10, P12 e P18. Ao se considerar que o Modelo geraria plantas similares às plantas do grupo 1, percebeu-se que este novo gerador teria a possibilidade de criar 30 plantas dentro das tipologias abordadas.

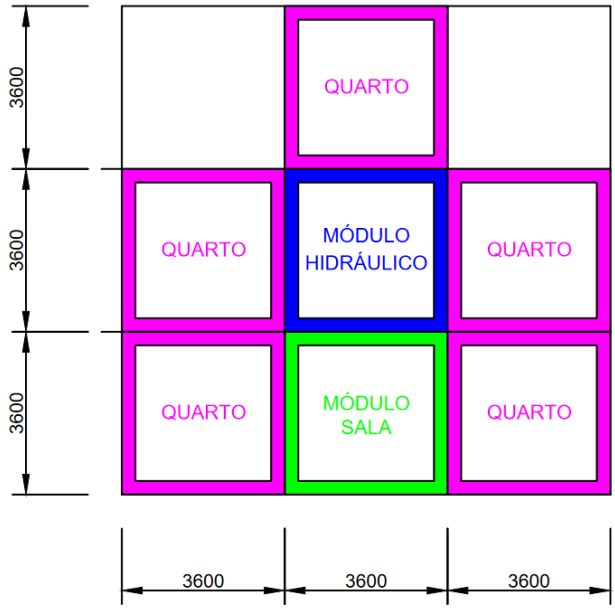


Fig.: Núcleo-base e possíveis posições de quartos.

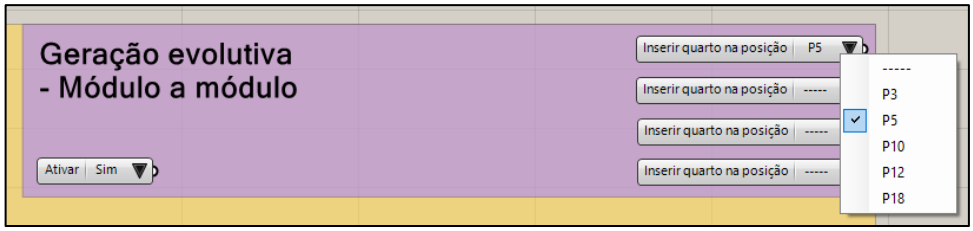


Fig.: Chaves seletoras de gerador de habitação por evolução.

Por fim, decidiu-se manter como uma ferramenta secundária o gerador antigo, visto que ele também representa as plantas do Grupo 2. Foi criada uma última função *GHPython* para realizar a definição do tipo de gerador de habitações a ser utilizado. Através de duas chaves seletoras situadas próximas de cada um dos geradores, pode-se definir qual deles ativado ("ativage" corresponde à ativação do gerador principal e "ativagtv" corresponde à ativação do gerador antigo). De acordo com a seleção realizada

pelo usuário, os dados relativos à variante e tipologia do gerador que foi definido sairiam como output desta função para depois serem processados pelo restante do mecanismo do Modelo Paramétrico.

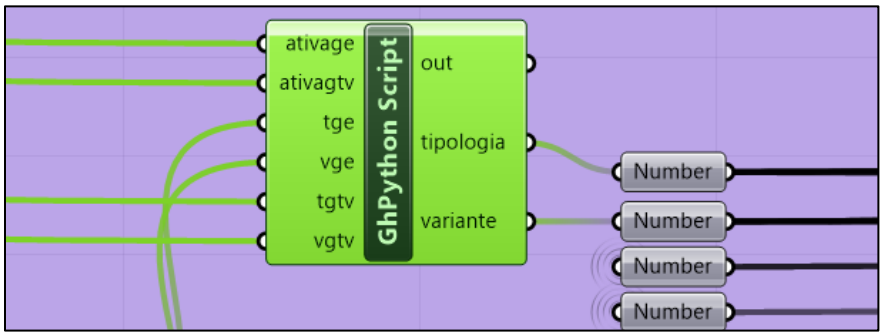


Fig.: Função *GHPython* responsável por filtrar a tipologia e variante de acordo com o gerador que está ativado.

PASSO 11

Iniciou-se o desenvolvimento da listagem geral de componentes. Foi aplicada em cada um dos módulos a mesma estruturação desenvolvida para a contagem dos telhados. Ao findar essa tarefa, entendeu-se que posteriormente seria necessário agregar o conteúdo de todos esses módulos em um produto final. Este produto seria, portanto, um agrupamento de outros 7 agrupamentos já feitos, nomeadamente o agrupamento das informações dos 4 quartos (Q1, Q2, Q3 e Q3), do Módulo Sala, do Módulo Hidráulico e dos telhados.

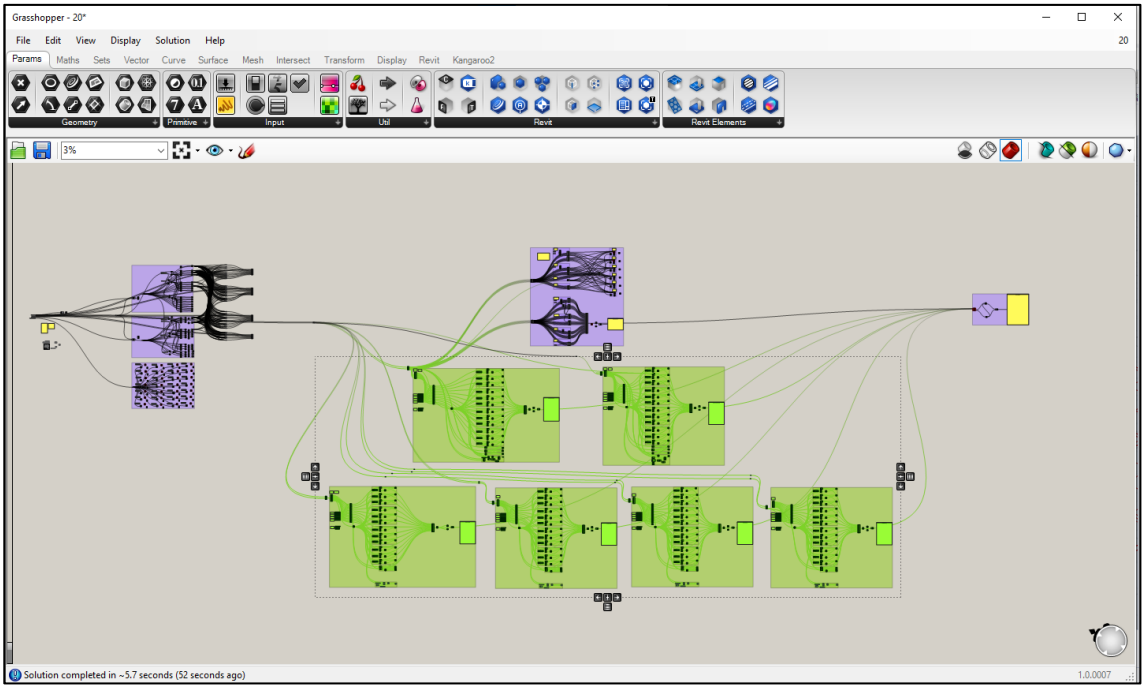


Fig.: Perspetiva geral do mecanismo, com as cadeias de funções dos seis elementos dos quartos em verde e a cadeia de função dos telhados logo acima.

Deste modo, todas as informações foram direcionadas à função *Element Name* (extraiu os nomes), foram separadas por nome e referência em *Member Index* e contadas em *Create Set*. Importante de se destacar que a função *Element Name* apresentou um erro, mas este era expectável, visto que ele alerta para o

facto de que entradas nulas não foram computadas. Todo o resultado foi reunido, e finalmente pôde ser visualizada a lista final de elementos de toda a habitação.

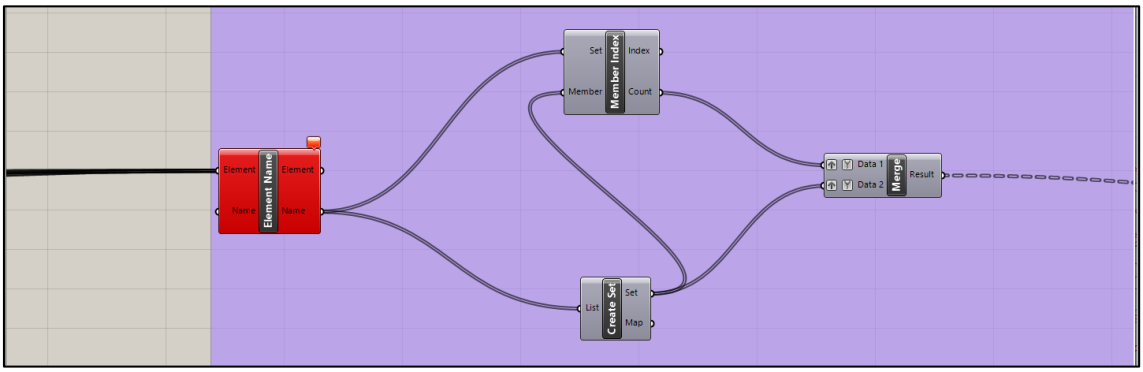


Fig.: Cadeia de funções para junção de todos os componentes em lista única.

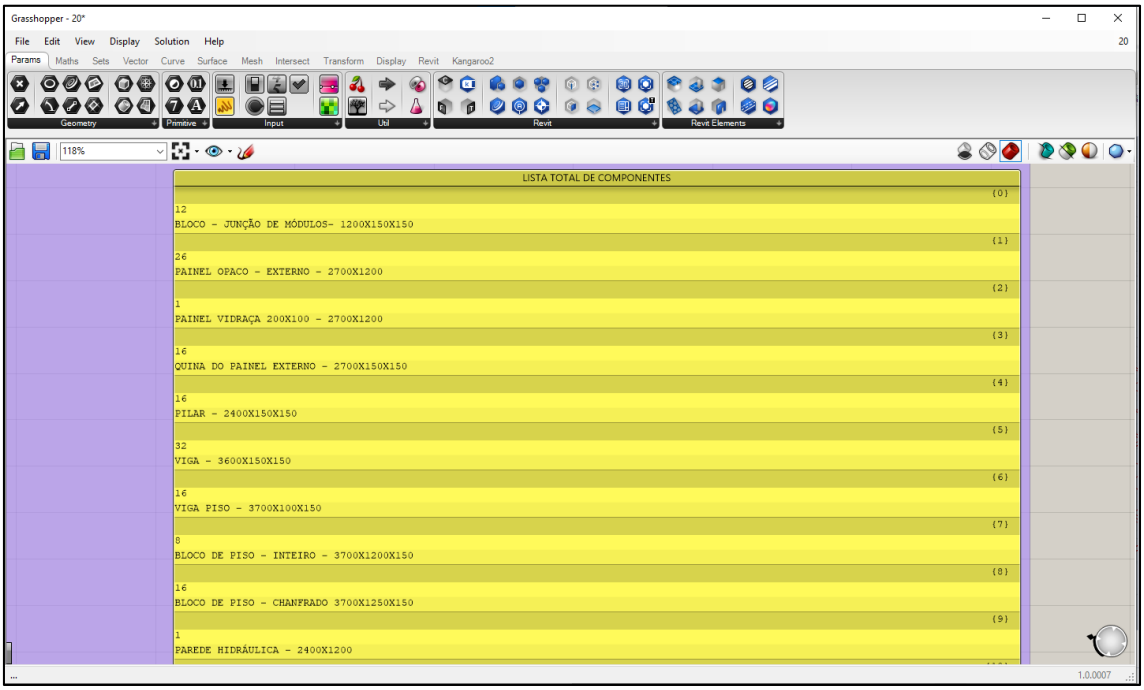


Fig.: Parte de lista de elementos de edificação de tipologia T3.

Desta maneira, foi possível visualizar a quantidade (lado esquerdo), o nome (abaixo) e a referência na lista (lado direito).

Ao passo que grande parte das funcionalidades foram atribuídas ao Modelo Paramétrico, restou de tarefas seguintes a criação das cadeias de funções referentes ao *deck* frontal, reorganizações pontuais e, principalmente, a realização de testes e gerações de projetos buscando abarcar diversas situações de tipologias e variações, para a identificação de eventuais erros e realização dos devidos reparos.

PASSO 12

Foi identificado que possíveis sobreposições poderiam ocorrer nas situações onde dois beirais de telhado se encontram. Dessa forma, entendeu-se que se um destes dois telhados não tivesse calha e tubo, a

situação se resolveria. Inicialmente, portanto, foi feito o desenho de um novo modelo de telhado sem calha e tubo para se encontrar com o telhado padrão.

Em seguida foi feita a codificação desta situação, para que este novo modelo de telhado sem calhas e tubulação fosse automaticamente atribuído a um dos dois telhados em casos de encontro de beirais. Em um código em uma função *GHPython*, foi estabelecido que sempre quando a edificação tivesse um encontro desse tipo, o telhado do módulo disposto na linha 2 do tabuleiro seria trocado por esta variante sem calha e tubo de queda.

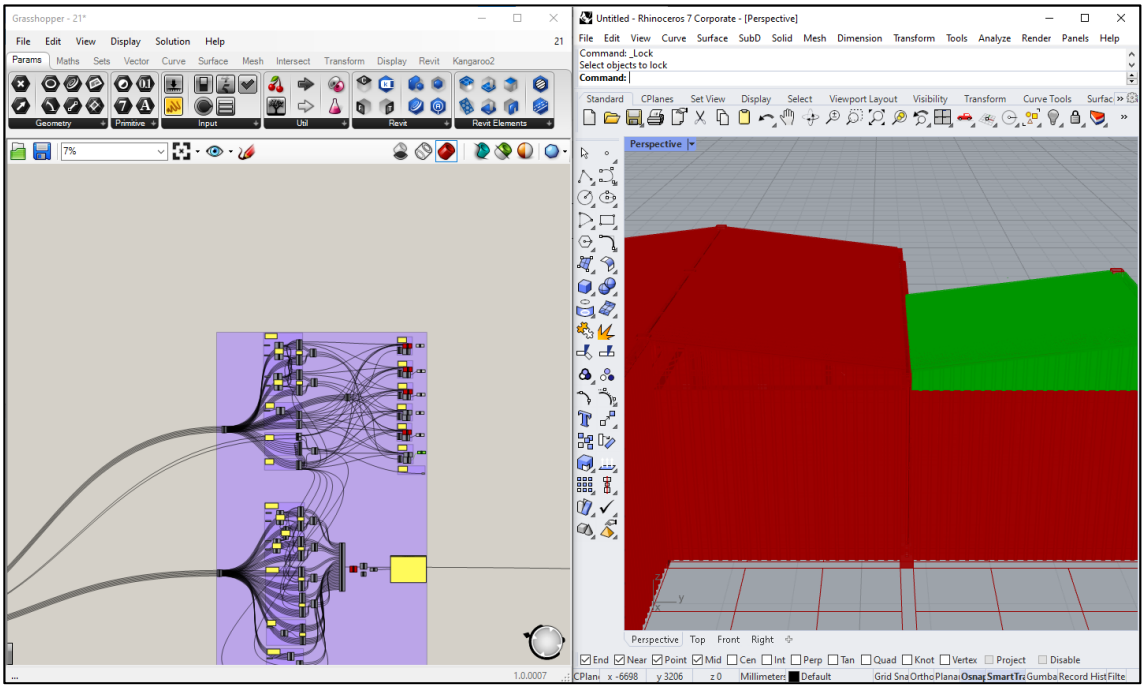


Fig.: Encontro de beirais de telhado em edificação de tipologia T4.

PASSO 13

Foi feita uma reorganização do quadro das chaves seletoras de definição de parâmetros. Em seguida foi realizada aplicação de cores a elementos distintos para melhoria da visualização, através das funções *Color Swatch* e *Custom Preview*.

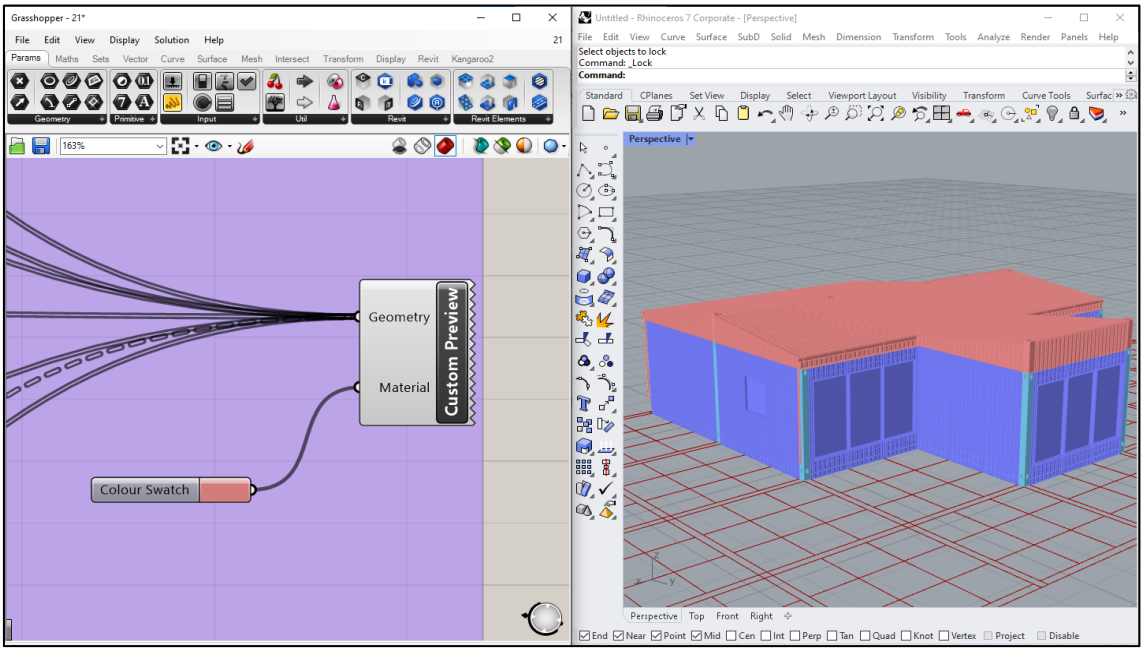


Fig.: Cadeia para aplicação de cor e Habitação de tipologia T4 com as devidas cores aplicadas.

Posteriormente, foi realizada a codificação do *deck* frontal e da escada. Foi definido que o *deck* somente ocuparia as frações frontais da edificação. No que tange a escada, por defeito foi configurada para sempre estar à frente do painel 2 do Módulo Sala, mas através de edições poderia ser disposta também à frente dos painéis 1 e 3. Por fim, foi atribuído um código que a movimenta a escada automaticamente para a frente do *deck*, quando o mesmo é ativado.

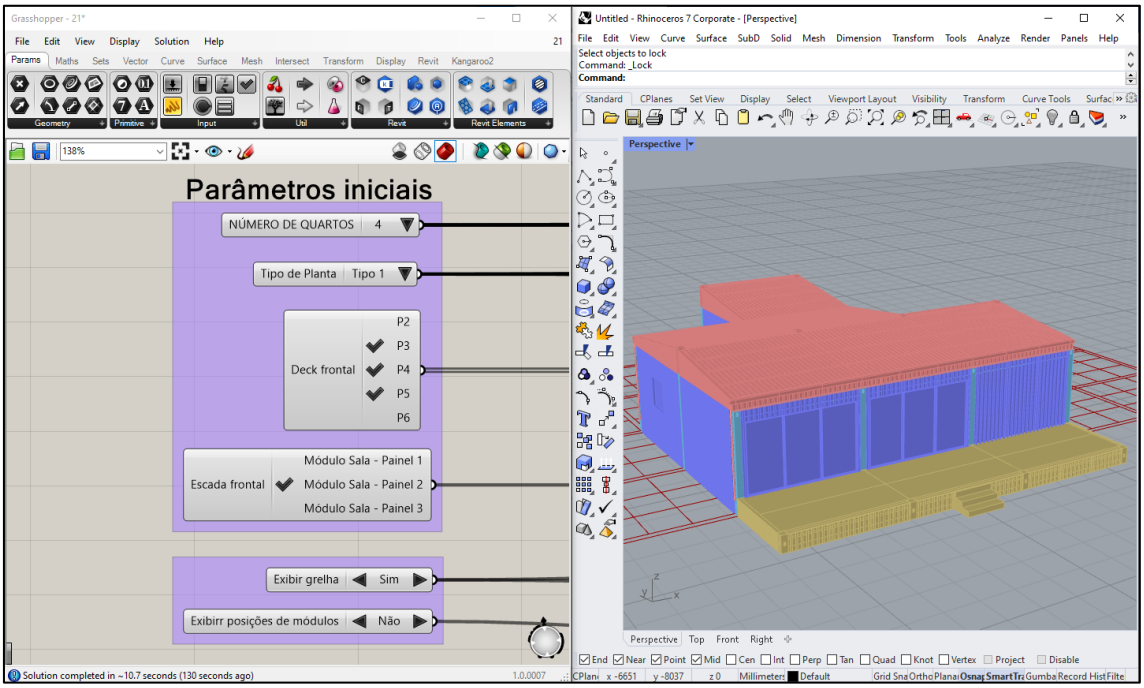


Fig.: Habitação de tipologia T4 com *deck* à frente das posições P3, P4 e P5 do tabuleiro modular.

PASSO 14

Foram revisadas todas as habitações a fim de se encontrar problemas de geração. Em nenhuma delas foi verificada inconsistência. Ao passo que as funcionalidades foram todas adicionadas e que os elementos se integraram da maneira adequada, se deu por encerrada a fase de desenvolvimento, restando apenas uma tarefa: reorganizar as cadeias de funções e as chaves seletoras, a fim de que a utilização do Modelo Paramétrico se torne mais intuitiva e consequentemente mais rápida.

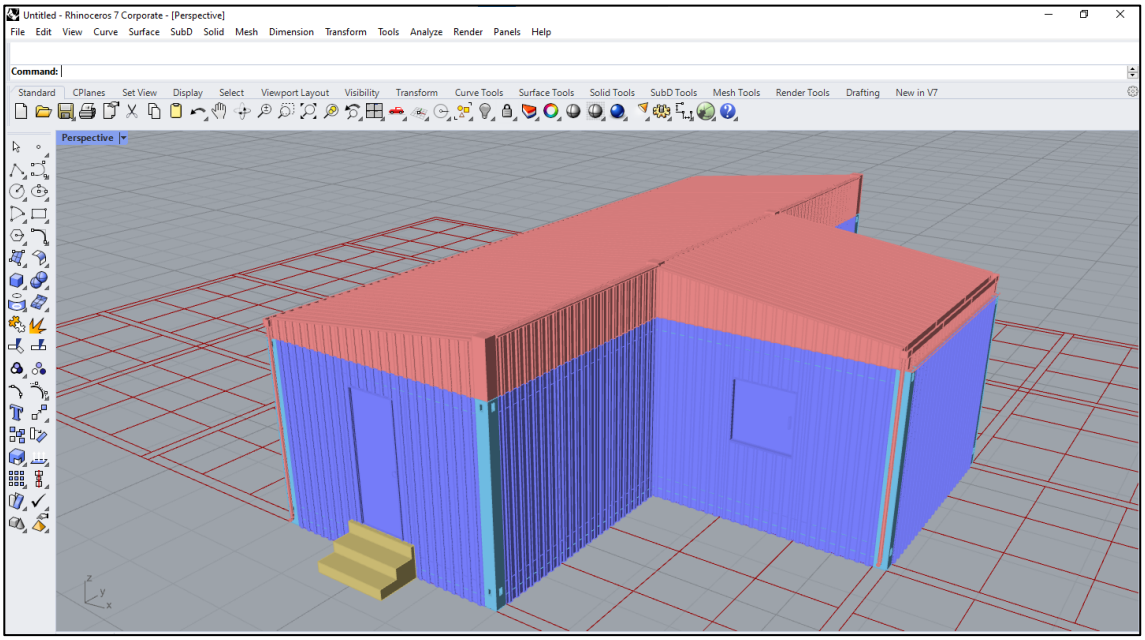


Fig.: Habitação T3 (planta de desenho 5) com telhados corretamente rotacionados e fechamentos corretos.

PASSO 15

Foi realizada a reorganização das chaves seletoras. Em uma seção do Modelo Paramétrico foi criado um novo painel de configurações contendo 3 grupos: o primeiro destes (no topo) relativo aos parâmetros para a Geração de habitação, o segundo (canto inferior esquerdo) relativo à Edição da habitação gerada e o terceiro (canto inferior direito) contendo a Lista de elementos da edificação gerada.

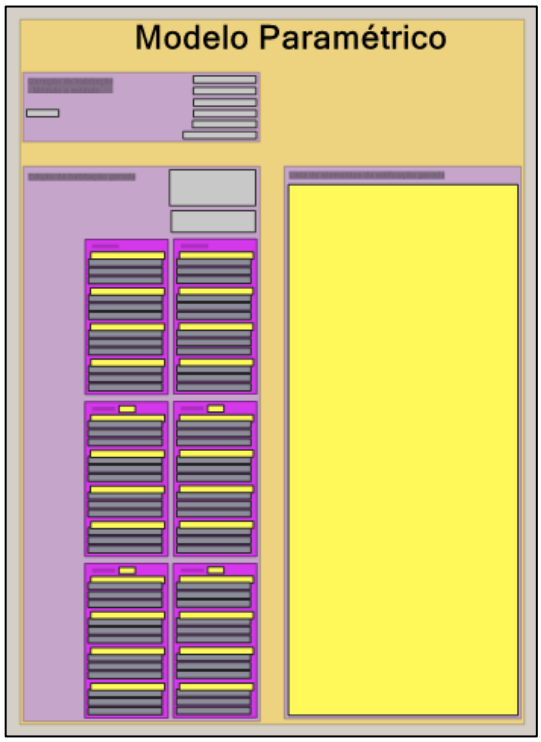


Fig.: Painel de configurações do Modelo Paramétrico.



Fig.: Chaves seletoras para a geração de habitação.

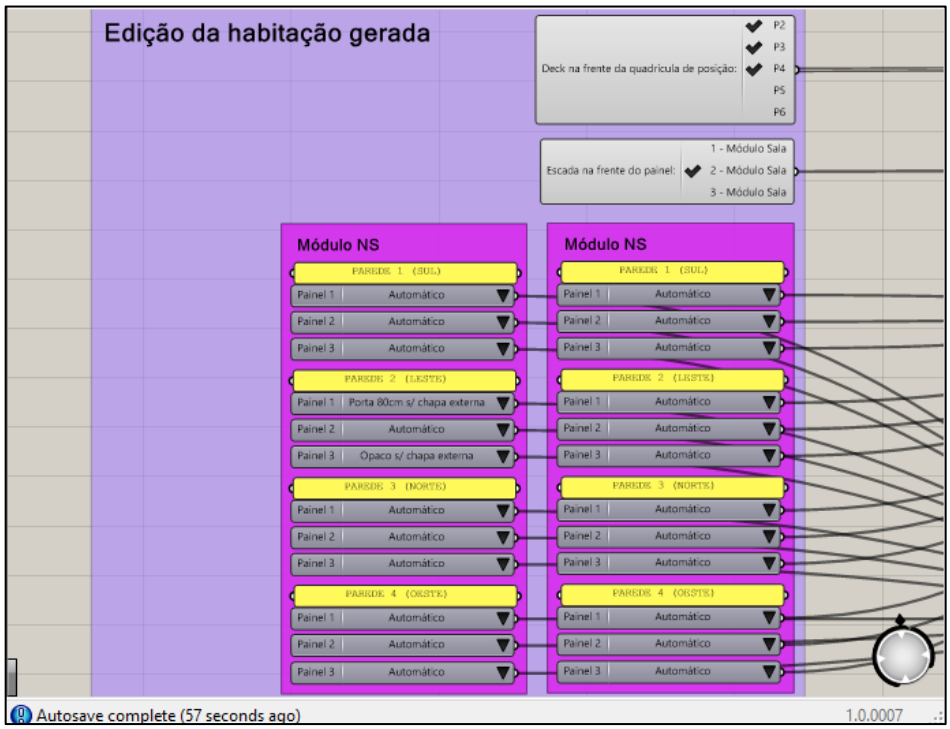


Fig.: Parte de bloco de Edição da habitação gerada: funcionalidades de inserção de *deck*, alteração de posição de escada e alterações de painéis de habitação.

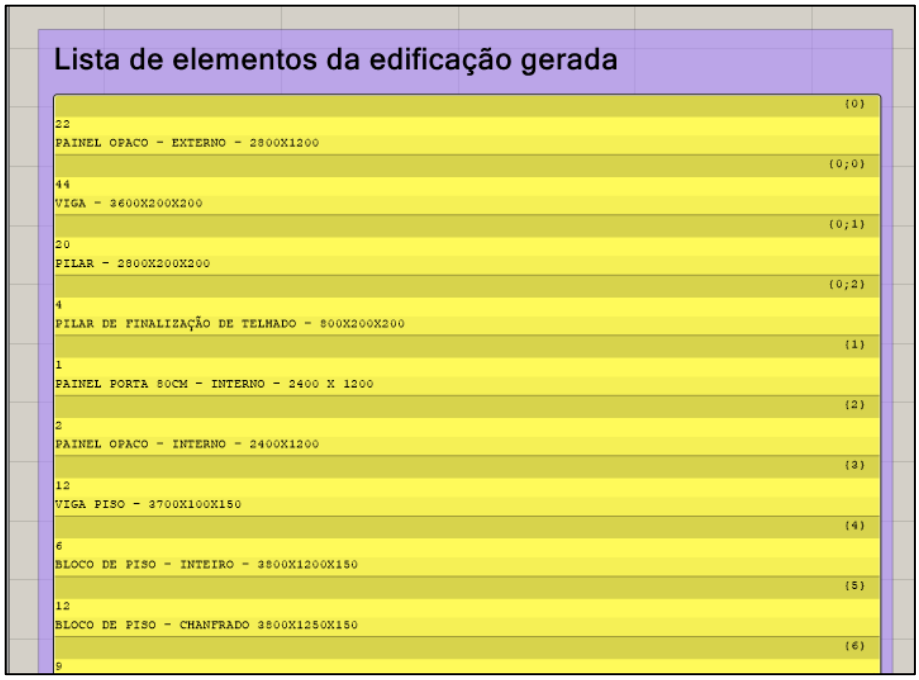


Fig.: Bloco com a listagem automática dos elementos da habitação.

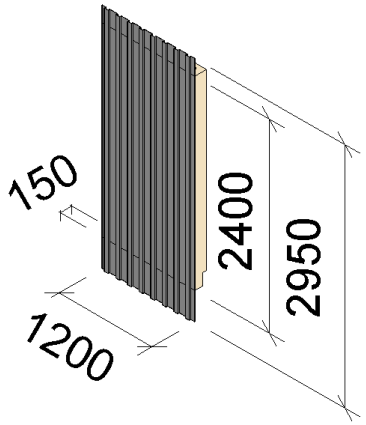
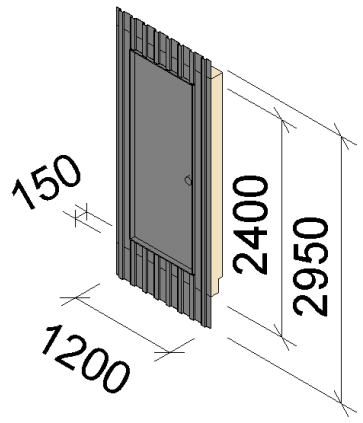
Desta maneira, após a modelagem dos elementos, a criação do Modelo Paramétrico que contém o gerador de projetos, o desenvolvimento de funcionalidades de edição e visualização dos elementos, e a realização de testes e reparos, deu-se por concluído o objeto do Caso de Estudo.

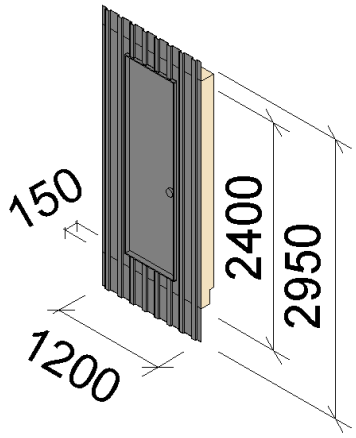
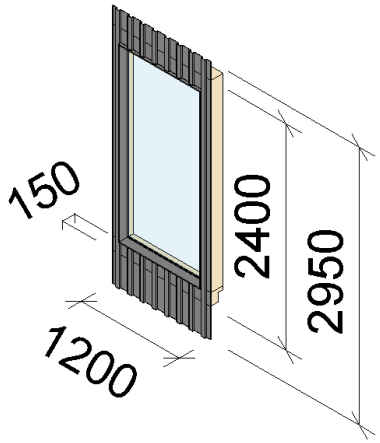
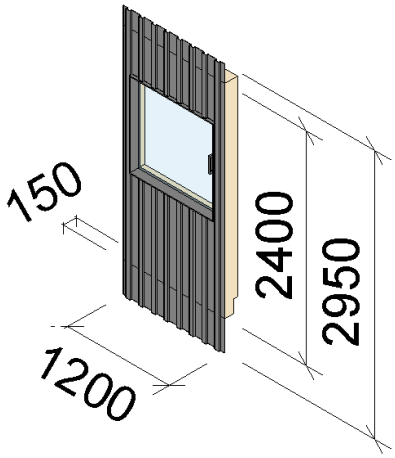
ANEXO II

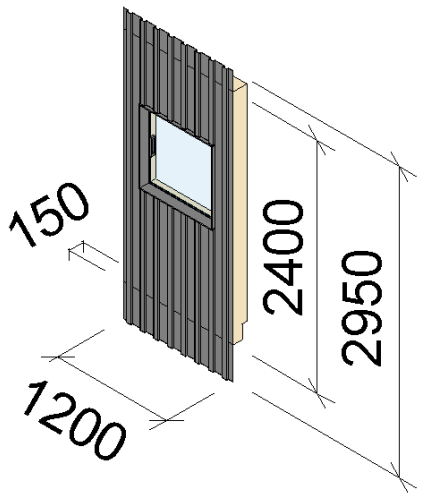
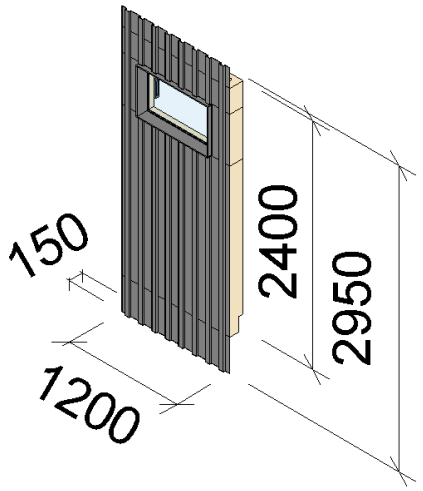
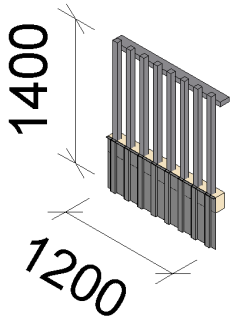
ELEMENTOS CONSTITUINTES DO MODELO PARAMÉTRICO

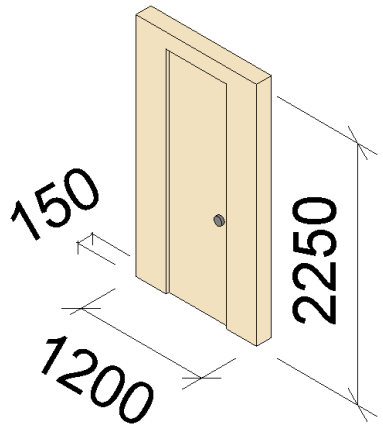
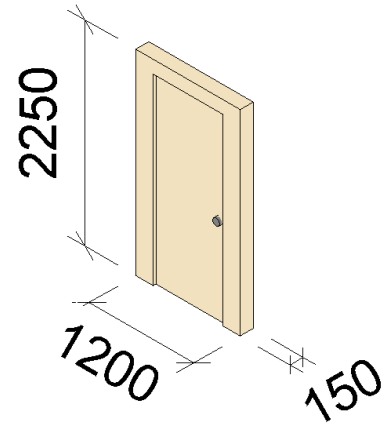
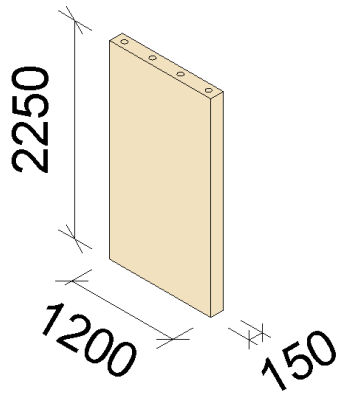
Este anexo apresenta todos os elementos que foram modelados em 3D no *software Revit* e posteriormente inseridos no software de design paramétrico *Grasshopper* (ambiente do software *Rhinoceros*) para a elaboração do Modelo Paramétrico.

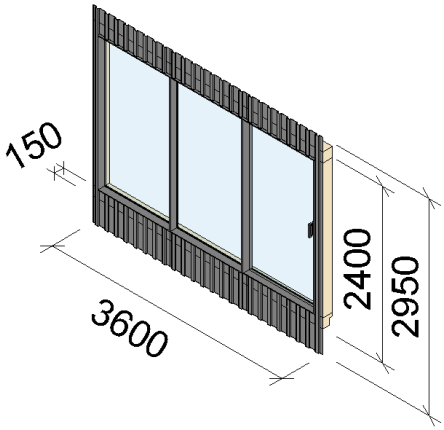
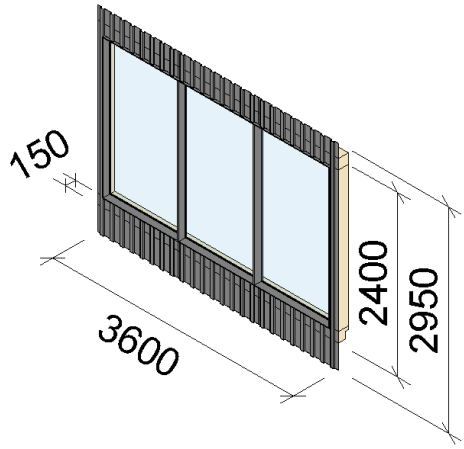
PAINÉIS

Identificação	Nome	Função	Dimensões	Imagem
1	Painel opaco	Parede exterior com chapa metálica externa	2800mm x 1200m x 150mm	
2	Porta 800mm	Parede exterior com chapa metálica externa e com abertura	2800mm x 1200m x 150mm e abertura de 2000mm x 800mm	

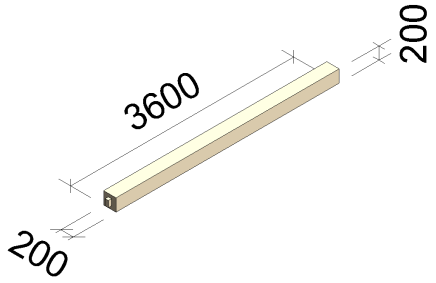
3	Porta 600mm	Parede exterior com chapa metálica externa e com abertura	2800mm x 1200m x 150mm e abertura de 2000mm x 600mm	
4	Vidraça 2000mm x 1000mm	Parede exterior com chapa metálica externa e com vidraça	2800mm x 1200m x 150mm e vidraça de 2000mm x 1000mm	
5	Janela 1000mm x 1000mm	Parede exterior com chapa metálica externa e com abertura	2800mm x 1200m x 150mm e janela de 1000mm x 1000mm	

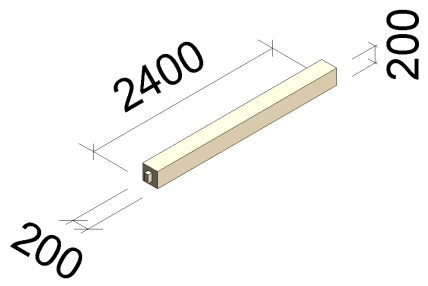
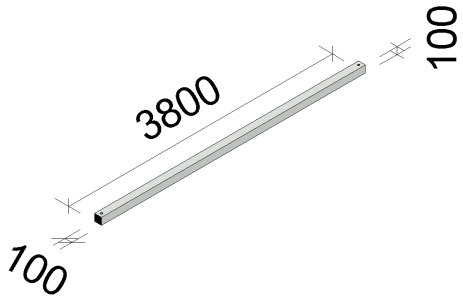
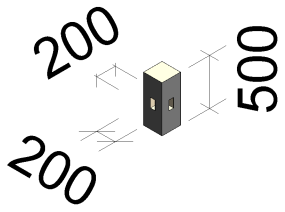
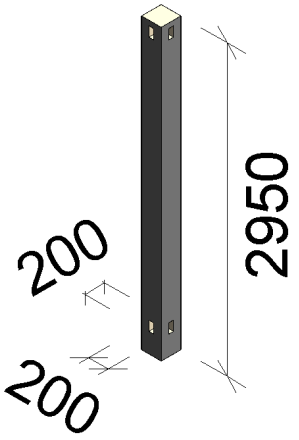
6	Janela 800mm 800mm	Parede exterior com chapa metálica externa e com abertura	2800mm x 1200m x 150mm e janela de 800mm x 800mm	
7	Janela 500mm x 800mm	Parede exterior com chapa metálica externa e com abertura	2800mm x 1200m x 150mm e janela de 500mm x 1000mm	
8	Guarda-corpo 1000mm	Guarda-corpo para varandas	1000mm x 1200m x 150mm	

9	Porta 600mm	Conexão interna entre compartimentos	2800mm x 1200m x 150mm e abertura de 2000mm x 600mm	
10	Porta 800mm	Conexão interna entre compartimentos	2800mm x 1200m x 150mm e abertura de 2000mm x 800mm	
11	Painel opaco	Divisão interna de compartimentos	2400mm x 1200mm x 150mm	

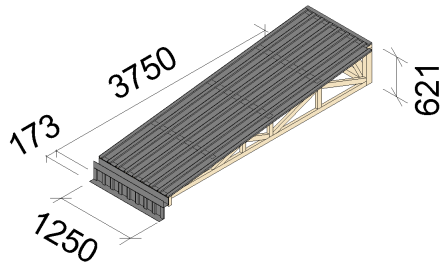
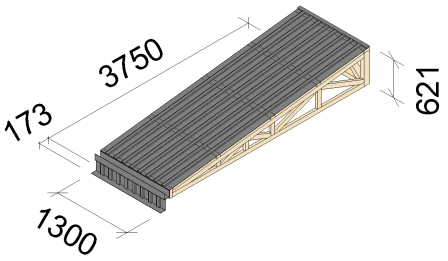
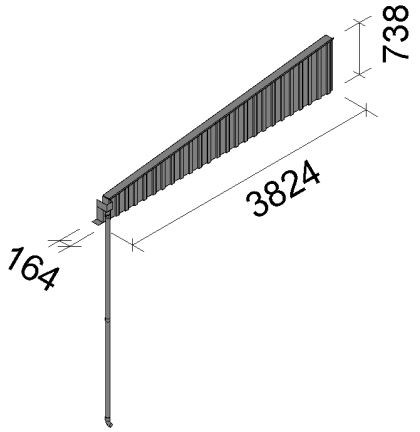
12	Parede de vidro com porta	Parede exterior com chapa metálica externa	3600mm x 2800mm x 150mm e porta de 2000mm x 1000mm	
13	Parede de vidro	Parede exterior com chapa metálica externa	3600mm x 2800mm x 150mm	

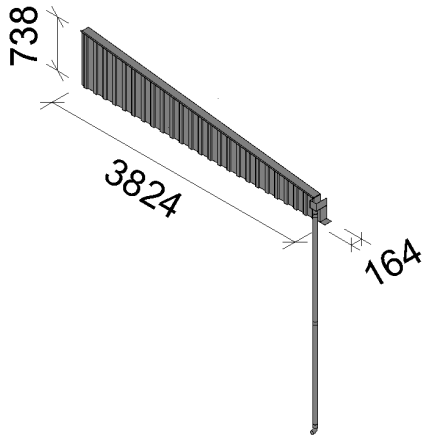
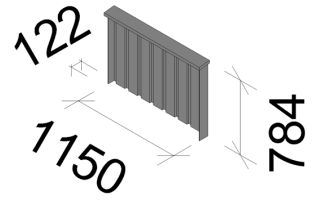
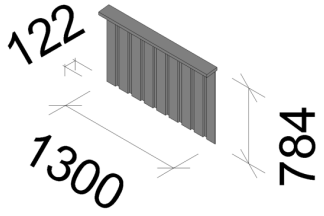
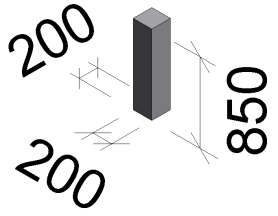
ESTRUTURA

Identificação	Nome	Função	Dimensões	Imagem
14	Viga	Sustentação para módulo e deck frontal	3600mm x 200mm x 200mm	

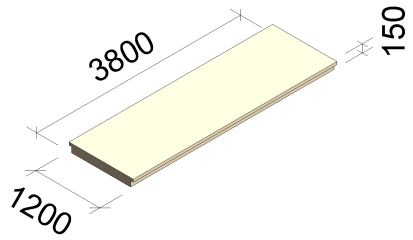
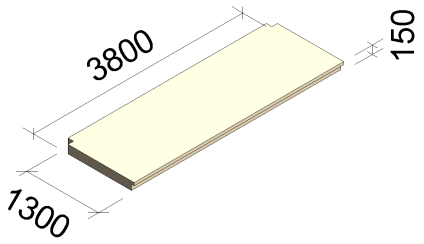
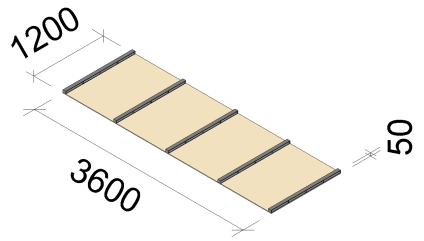
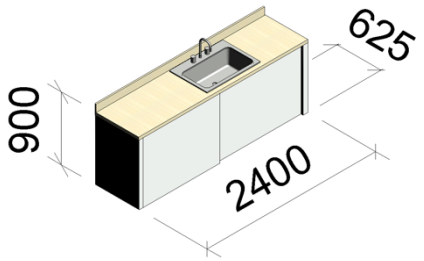
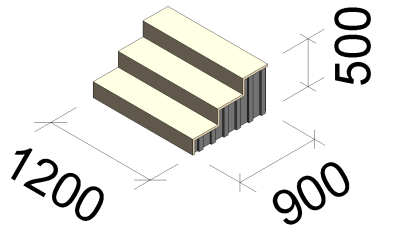
15	Viga para deck	Sustentação de deck frontal	2400mm x 200mm x 200mm	
16	Viga metálica	Elemento adicional para sustentação de piso	3700mm x 100mm x 100mm	
17	Pilar para deck	Elemento para sustentação de deck	500mm x 200mm x 200mm	
18	Pilar	Elemento para sustentação de módulo	2800mm x 200mm x 200mm	

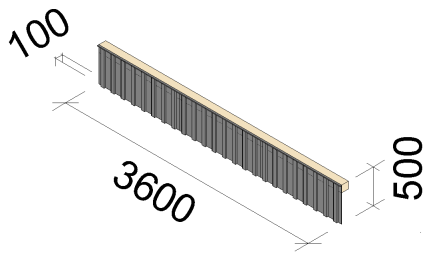
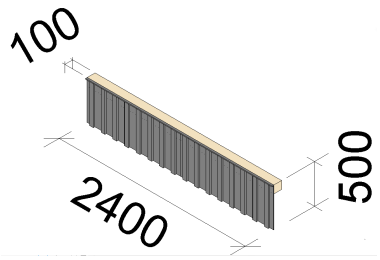
COMPONENTES DE TELHADO

Identificação	Nome	Função	Dimensões	Imagem
19	Módulo de telhado 1 e 3 (esquerda e direita)	Cobertura	3600mm x 1200mm x 800mm	
20	Módulo de telhado 2 (centro)	Cobertura	3600mm x 1200mm x 800mm	
21	Fechamento direito de telhado	Proteção da cobertura	3600mm x 800mm x 50mm (sem tubulação)	

22	Fechamento esquerdo de telhado	Proteção da cobertura	3600mm x 800mm x 50mm (sem tubulação)	
23	Fechamento traseiro dos telhados 1 esquerda) e 3 (direita)	Proteção da cobertura	1200mm x 800mm x 50mm	
24	Fechamento traseiro do telhado 2 (centro)	Proteção da cobertura	1200mm x 800mm x 50mm	
25	Arremate de quina de telhado	Encaixe dos módulos de telhado e manutenção da métrica	850mm x 200mm x 200mm	

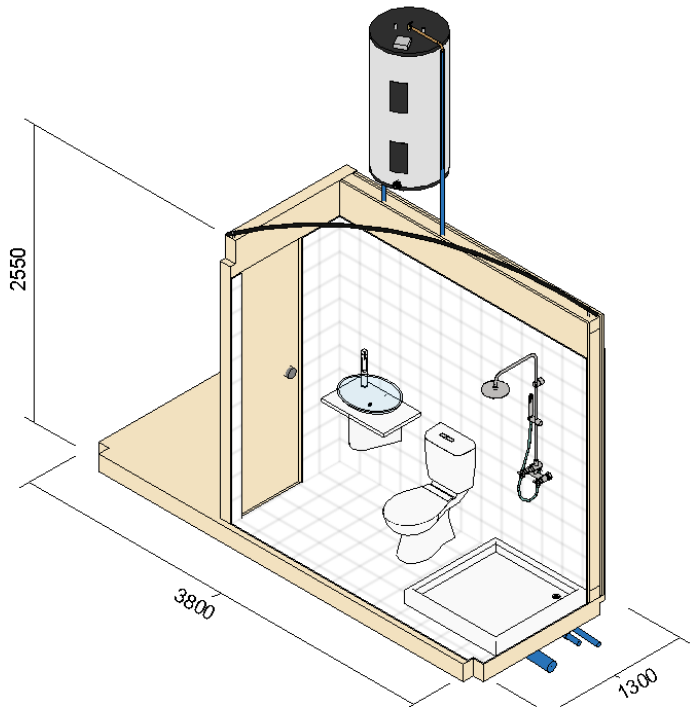
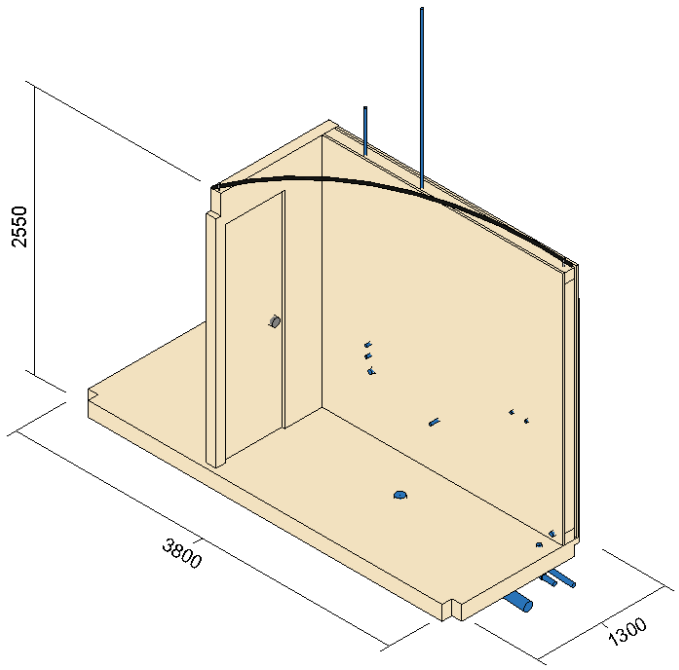
OUTROS

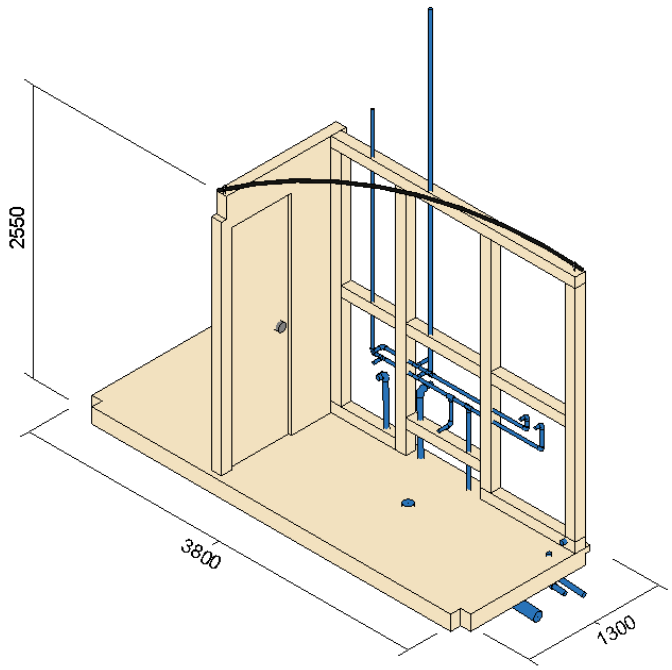
Identificação	Nome	Função	Dimensões	Imagem
26	Bloco de piso central	Laje de piso e de cobertura	3700mm x 1200mm x 150mm	
27	Painel de piso de canto	Laje de piso e de cobertura	3700mm x 1250mm x 150mm	
28	Painel de forro	Acabamento superior e passagem de conduítes	3600mm x 1200mm x 50mm	
29	Bancada	Anteparo para cozinha com cuba em inox	1800mm x 600mm x 900mm	
30	Escada	Acesso à edificação ou deck	500mm x 1200mm x 750mm	

31	Fechamento frontal de deck	Proteção e acabamento da zona inferior do deck	3600mm x 500mm x 100mm	
32	Fechamento lateral de deck	Proteção e acabamento da zona inferior do deck	2400mm x 500mm x 100mm	

MÓDULO QB

33	Módulo QB (quarto de banho)	Contém: - Parede com equipamentos de casa de banho, infraestrutura para casa de banho e infraestrutura para pia da cozinha; - Parede com porta de 0,60m; - Bloco de piso adaptado para casa de banho.	3600mm (comprimento) x 2400mm (largura) x 2550 (altura)

Módulo QB completo	
Módulo QB sem revestimentos e equipamentos	

Módulo QB com parede hidráulica aberta	

ANEXO III

PLANTAS DE HABITAÇÕES DISPONÍVEIS NO MODELO PARAMÉTRICO

Este anexo apresenta todos os 42 desenhos de plantas possíveis de serem gerados e trabalhados dentro do Modelo Paramétrico.

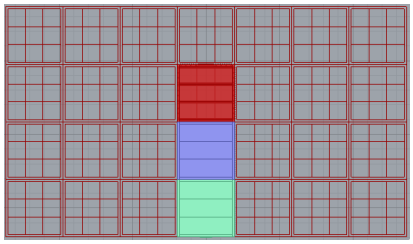
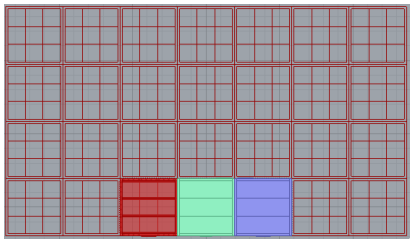
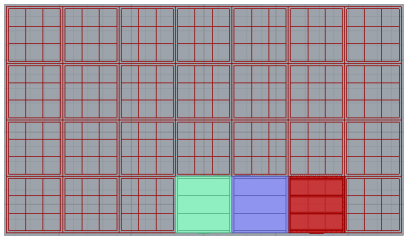
Legenda:

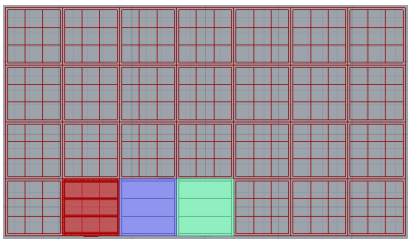
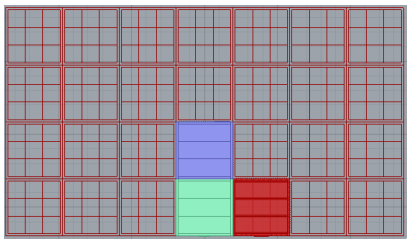
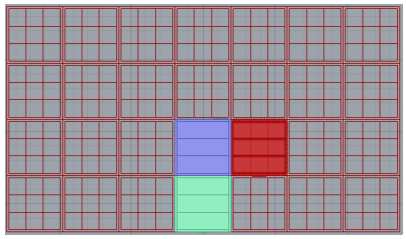
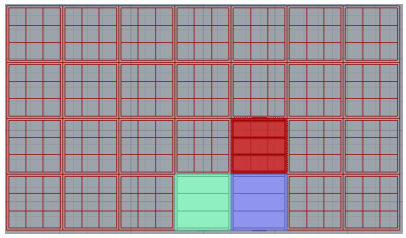
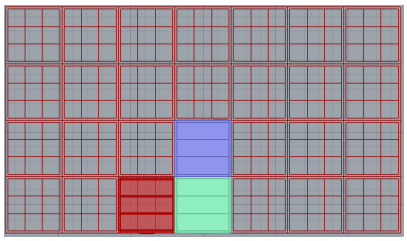
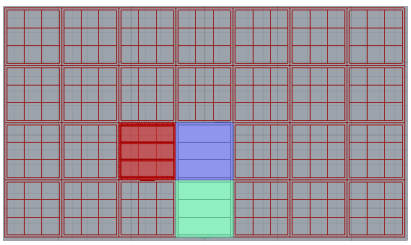

Módulo Sala

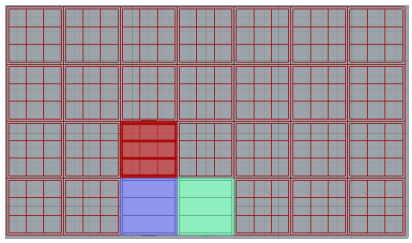

Módulo Hidráulico


Quarto

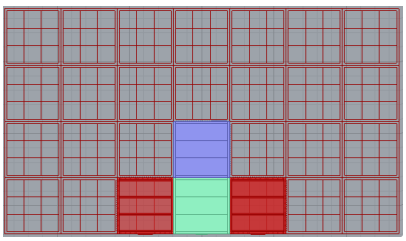
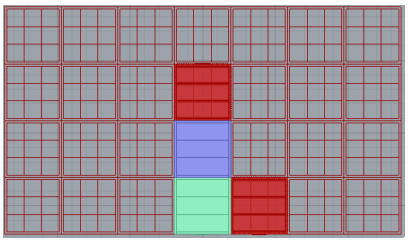
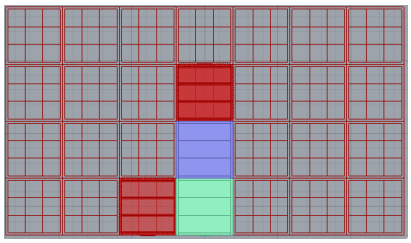
TIPOLOGIA T1 – 1 QUARTO

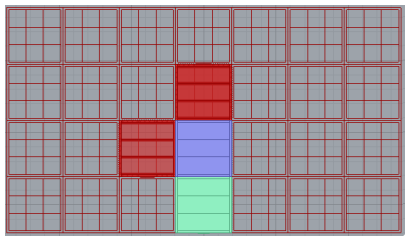
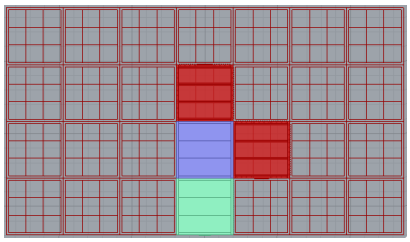
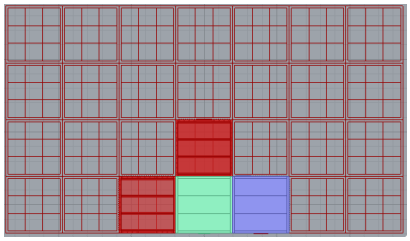
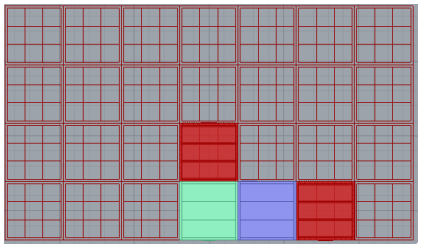
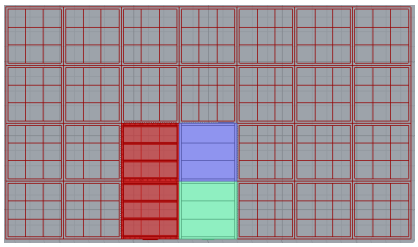
Nome	Número (variante) da planta	Grupo (1 - Núcleo-base no eixo Y, 2 - Núcleo-base no eixo X)	Imagem
Q1P1	Planta 1	1	
Q1P2	Planta 2	2	
Q1P3	Planta 3	2	

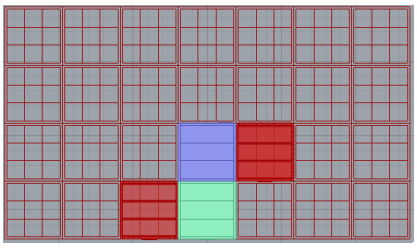
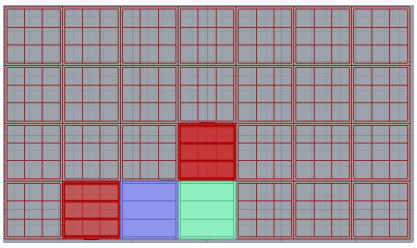
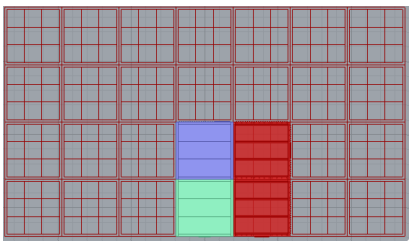
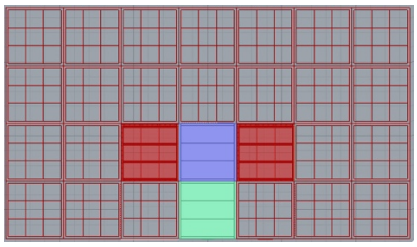
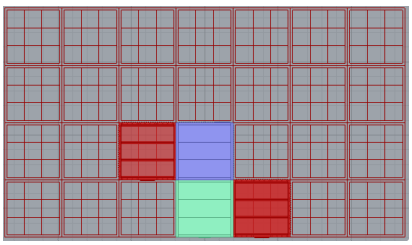
Q1P4	Planta 4	2	
Q1P5	Planta 5	1	
Q1P6	Planta 6	1	
Q1P7	Planta 7	2	
Q1P8	Planta 8	1	
Q1P9	Planta 9	1	

Q1P10	Planta 10	2	

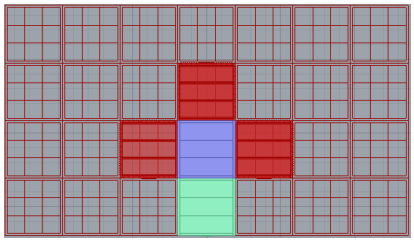
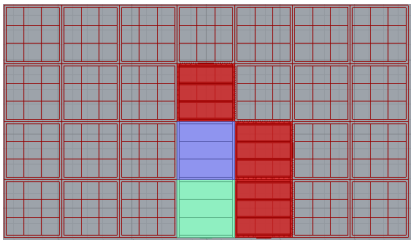
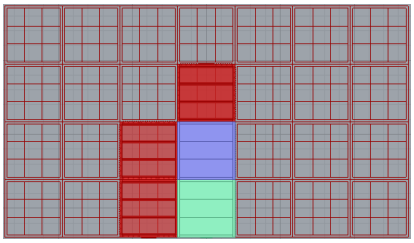
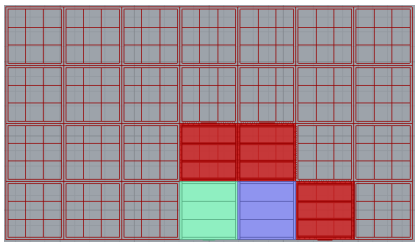
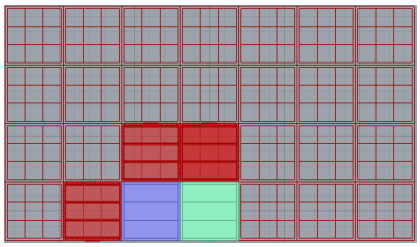
TIPOLOGIA T2 – 2 QUARTOS

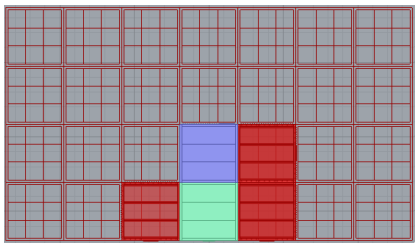
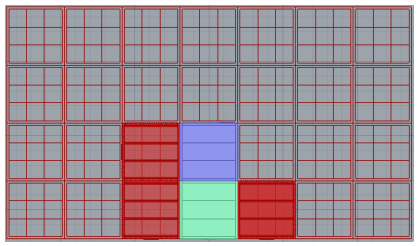
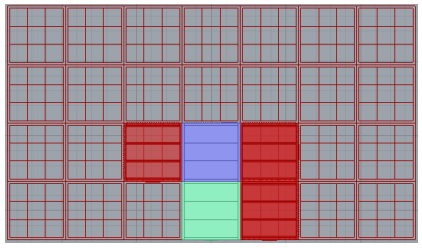
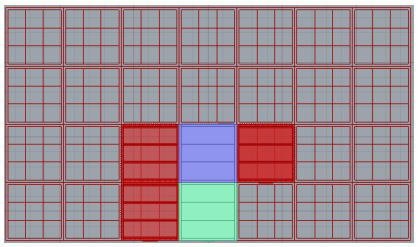
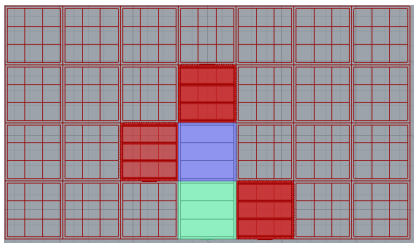
Nome	Número (variante) da planta	Grupo (1 - Núcleo-base no eixo Y, 2 - Núcleo-base no eixo X)	Imagem
Q2P1	Planta 1	1	
Q2P2	Planta 2	1	
Q2P3	Planta 3	1	

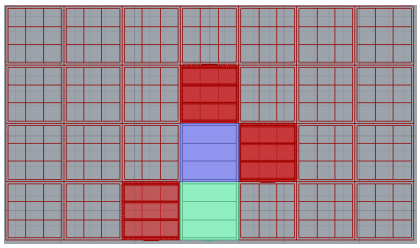
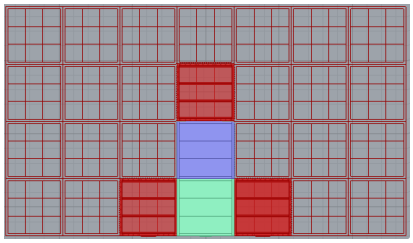
Q2P4	Planta 4	1	
Q2P5	Planta 5	1	
Q2P6	Planta 6	2	
Q2P7	Planta 7	2	
Q2P8	Planta 8	1	

Q2P9	Planta 9	1	
Q2P10	Planta 10	2	
Q2P11	Planta 11	1	
Q2P12	Planta 12	1	
Q2P13	Planta 13	1	

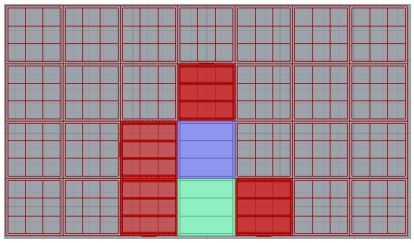
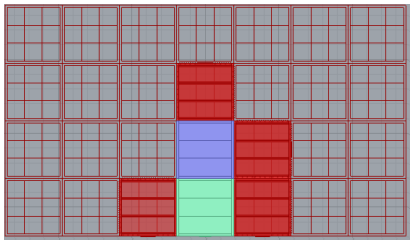
TIPOLOGIA T3 – 3 QUARTOS

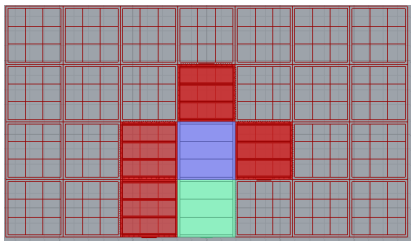
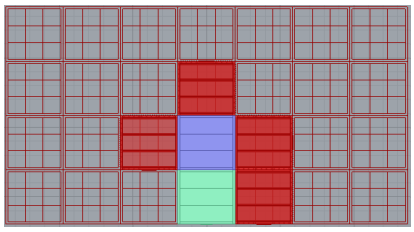
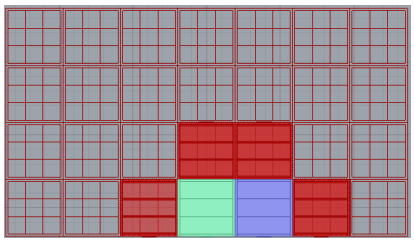
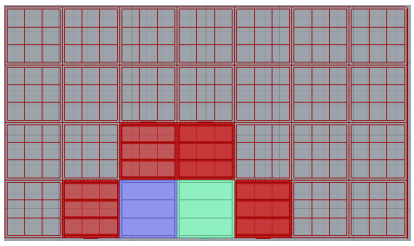
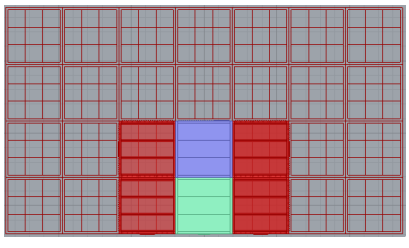
Nome	Número (variante) da planta	Grupo (1 - Núcleo-base no eixo Y, 2 - Núcleo-base no eixo X)	Imagem
Q3P1	Planta 1	1	
Q3P2	Planta 2	1	
Q3P3	Planta 3	1	
Q3P4	Planta 4	2	
Q3P5	Planta 5	2	

Q3P6	Planta 6	1	
Q3P7	Planta 7	1	
Q3P8	Planta 8	1	
Q3P9	Planta 9	1	
Q3P10	Planta 10	1	

Q3P11	Planta 11	1	
Q3P12	Planta 12	1	

TIPOLOGIA T4 – 4 QUARTOS

Nome	Número (variante) da planta	Grupo (1 - Núcleo-base no eixo Y, 2 - Núcleo-base no eixo X)	Imagem
Q4P1	Planta 1	1	
Q4P2	Planta 2	1	

Q4P3	Planta 3	1	
Q4P4	Planta 4	1	
Q4P5	Planta 5	2	
Q4P6	Planta 6	2	
Q4P7	Planta 7	1	

ANEXO IV

PROJETO DE VALIDAÇÃO DO MODELO PARAMÉTRICO

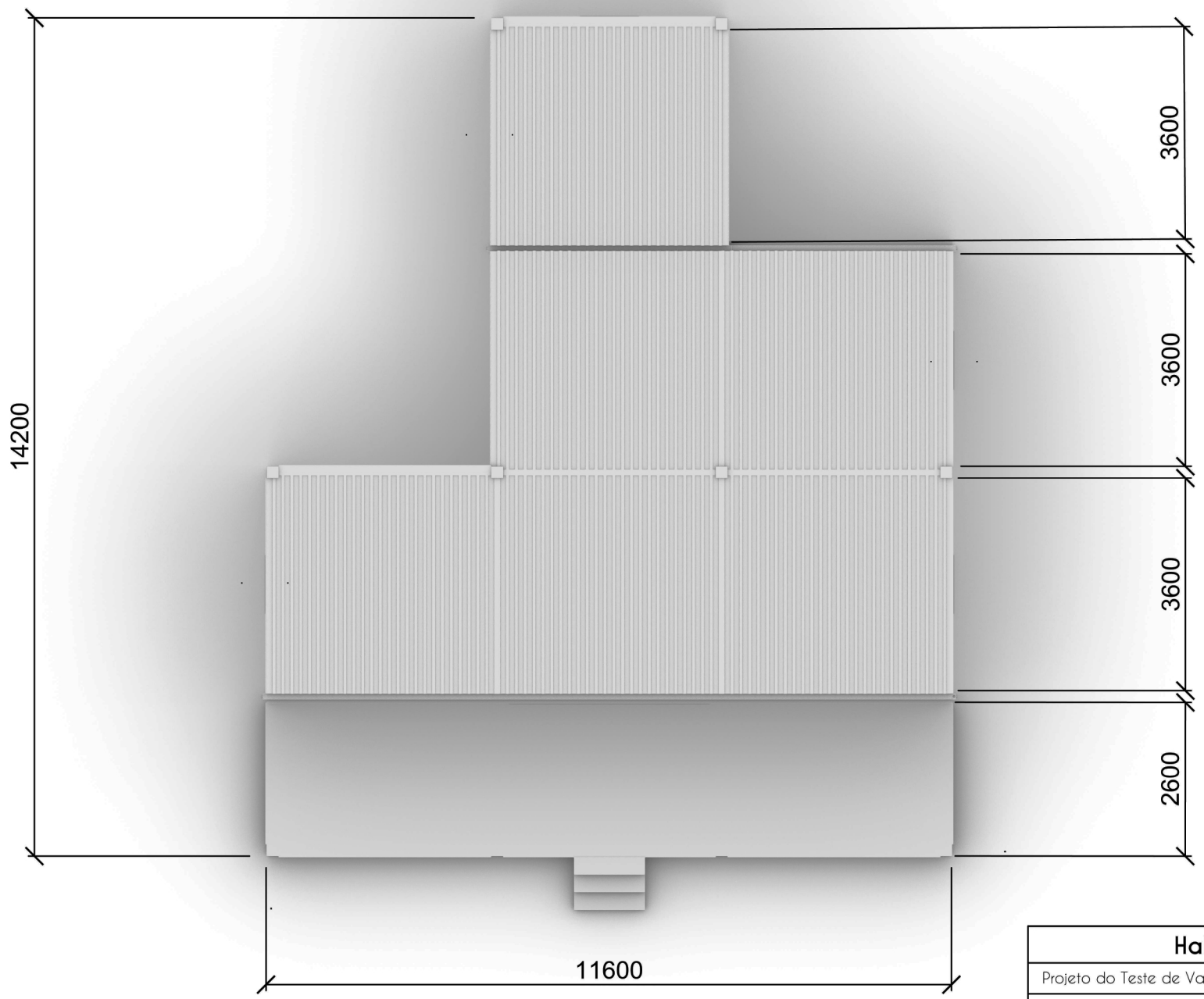
Este anexo apresenta a lista de elementos e todas as plantas do projeto de validação do Modelo Paramétrico, projeto este que foi criado através da "Geração por tipologia e variante".

A tipologia escolhida foi "T4", com quartos dispostos nas posições "P5", "P12", "P3" e "P18". Desta maneira, a habitação é composta por seis módulos: Núcleo-base (Módulo Sala + Módulo Hidráulico) e os 4 compartimentos adjacentes (Quartos 1, 2, 3 e 4). Ademais, a edificação possui 3 módulos de deck na fachada, estes situados à frente das posições "P3", "P4" e "P5".

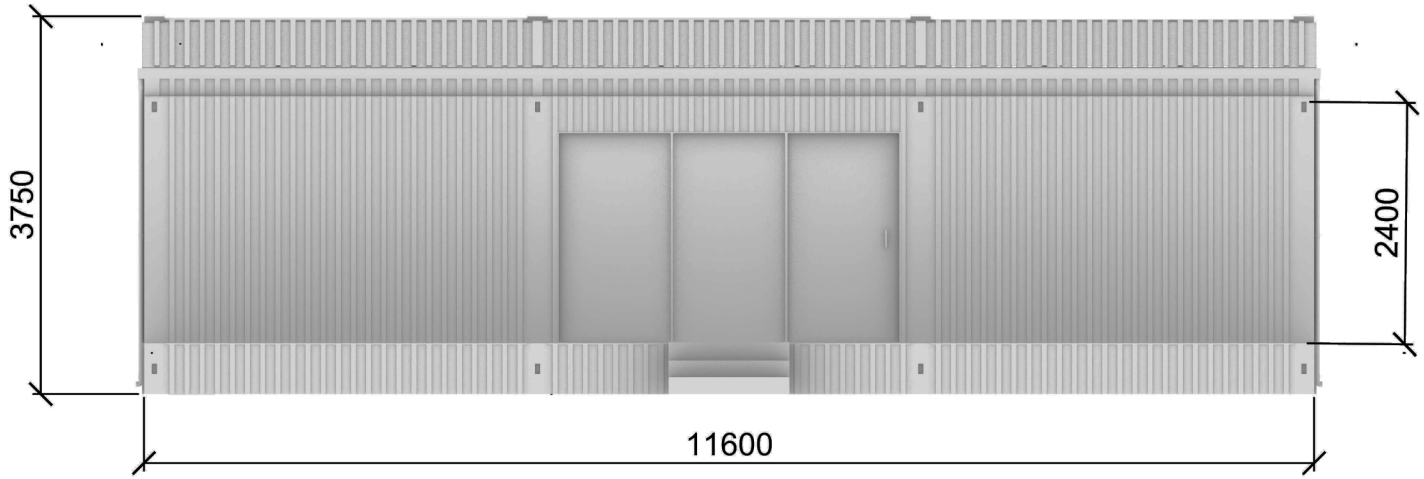
Lista de Elementos pertencentes à edificação gerada.

Item	Quantidade
Módulo hidráulico 3600mm x 2400mm	1
Pilar de finalização de telhado	8
Painel porta de 800mm	4
Viga 3600mm x 200mm x 200mm	36
Pilar 2800mm x 200mm x 200mm	13
Painel opaco interno	11
Painel opaco externo	29
Viga piso 3700mm x 100mm x 150mm	24
Bloco de piso de canto	24
Bloco de piso de centro	12
Painel de forro 3600mm x 3600mm	18
Painel vidraça 2000mm x 1000mm	1
Pano de vidro 3600mm x 2400mm	1
Pano de vidro 3600mm x 2400mm com porta	1

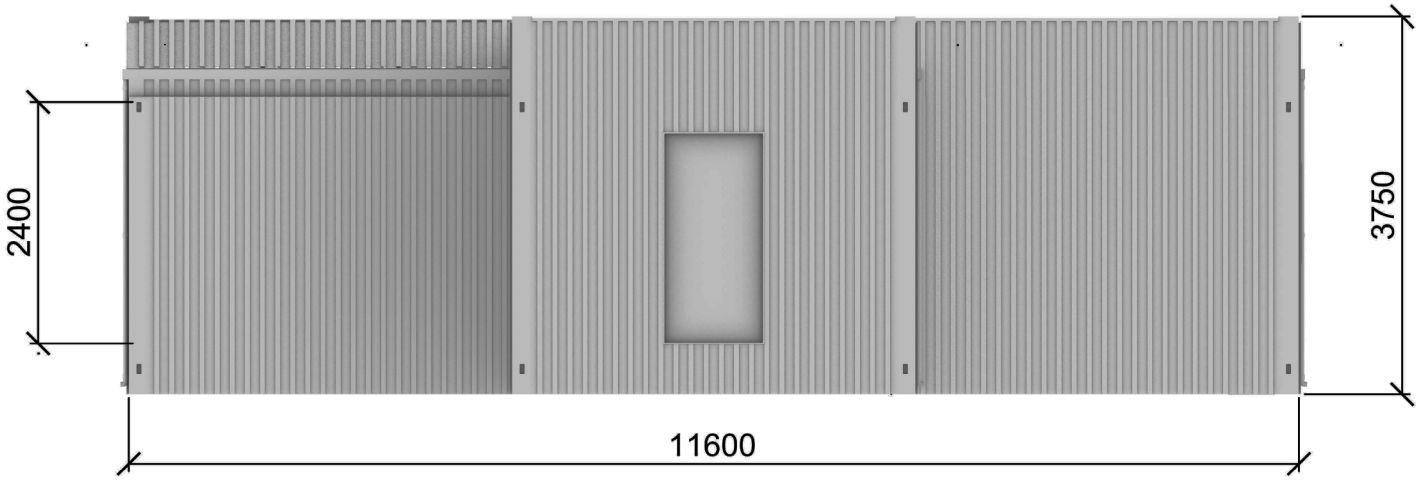
Painel janela de 1000mm x 1000mm	3
Fechamento direito de telhado	3
Fechamento esquerdo de telhado	3
Fechamento traseiro de telhado (parte 1)	2
Fechamento traseiro de telhado (parte 2)	2
Fechamento traseiro de telhado (parte 3)	2
Telhado (parte 1)	6
Telhado (parte 2)	6
Telhado (parte 3)	6
Bancada para cozinha	1
Cuba de cozinha em inox	1
Pilar de deck 500mm x 200mm x 200mm	4
Viga frontal de deck 3600mm x 200mm x 200mm	3
Viga lateral de deck 2400mm x 200mm x 200mm	4
Bloco de piso para deck 3800mm x 1250mm x 150mm	6
Fechamento frontal deck 3600mm x 500mm	3
Fechamento lateral deck 2400mm x 500mm	2
Escada 1200mm x 500mm	1



Habitação "T4"		
Projeto do Teste de Validação - DISS/MPRINCE		1:100
Planta de situação	U.PORTO FEUP FACULDADE DE ENGENHARIA UNIVERSIDADE DO PORTO	1/4
Autor: Guilherme Pires		

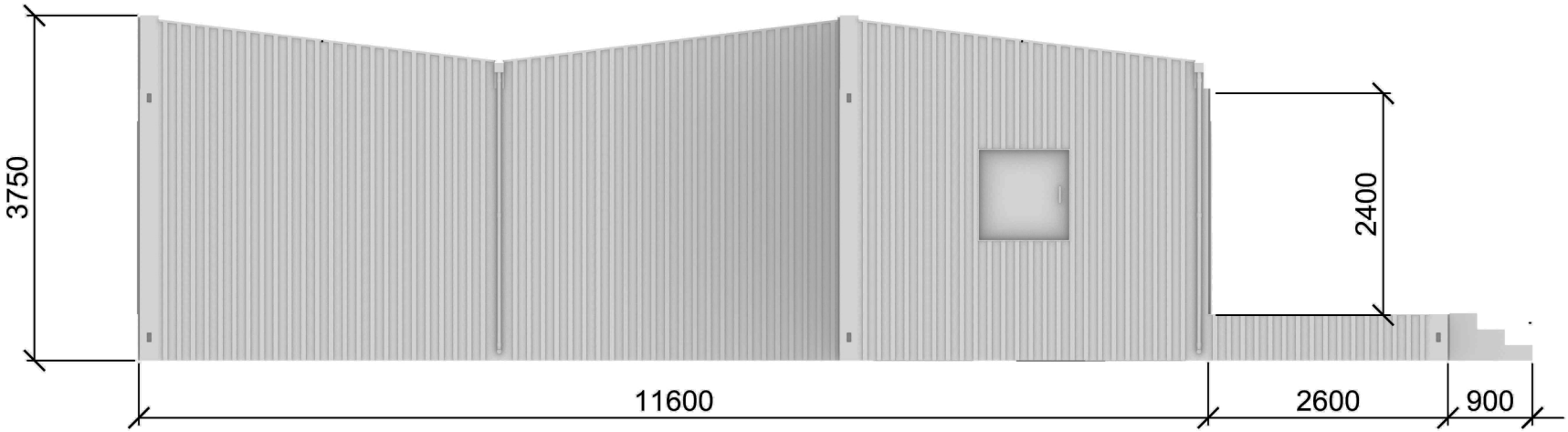


FACHADA FRONTAL

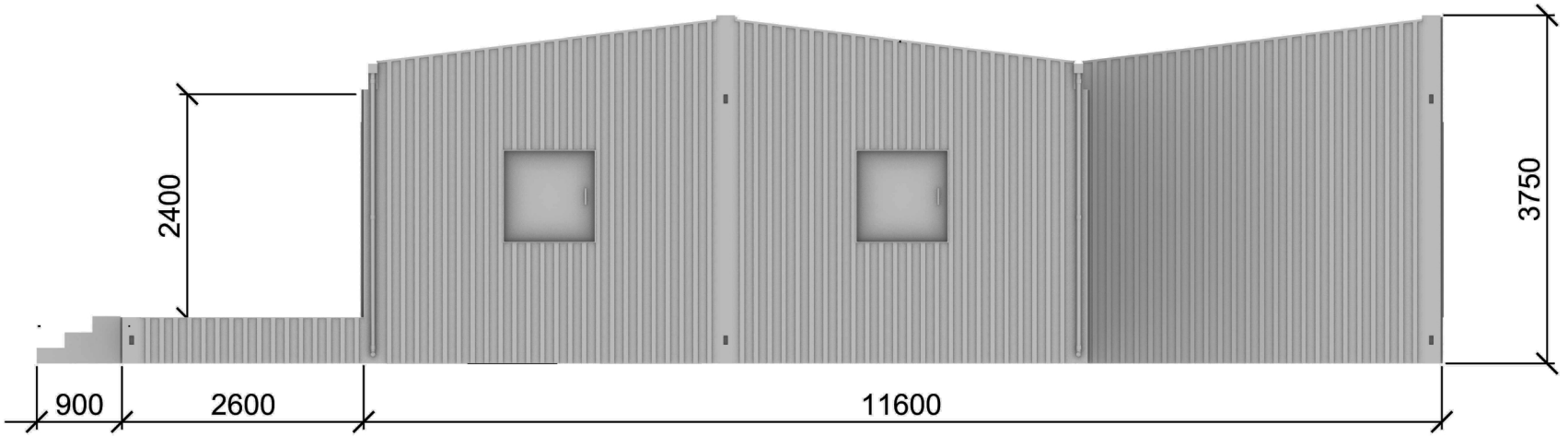


FACHADA TRASEIRA

Habitação "T4"		
Unidade Curricular "DISS" - MPRINCE		1:75
Fachadas F. e T.	U.PORTO FEUP FACULDADE DE ENGENHARIA UNIVERSIDADE DO PORTO	2/4
Autor: Guilherme Pires		

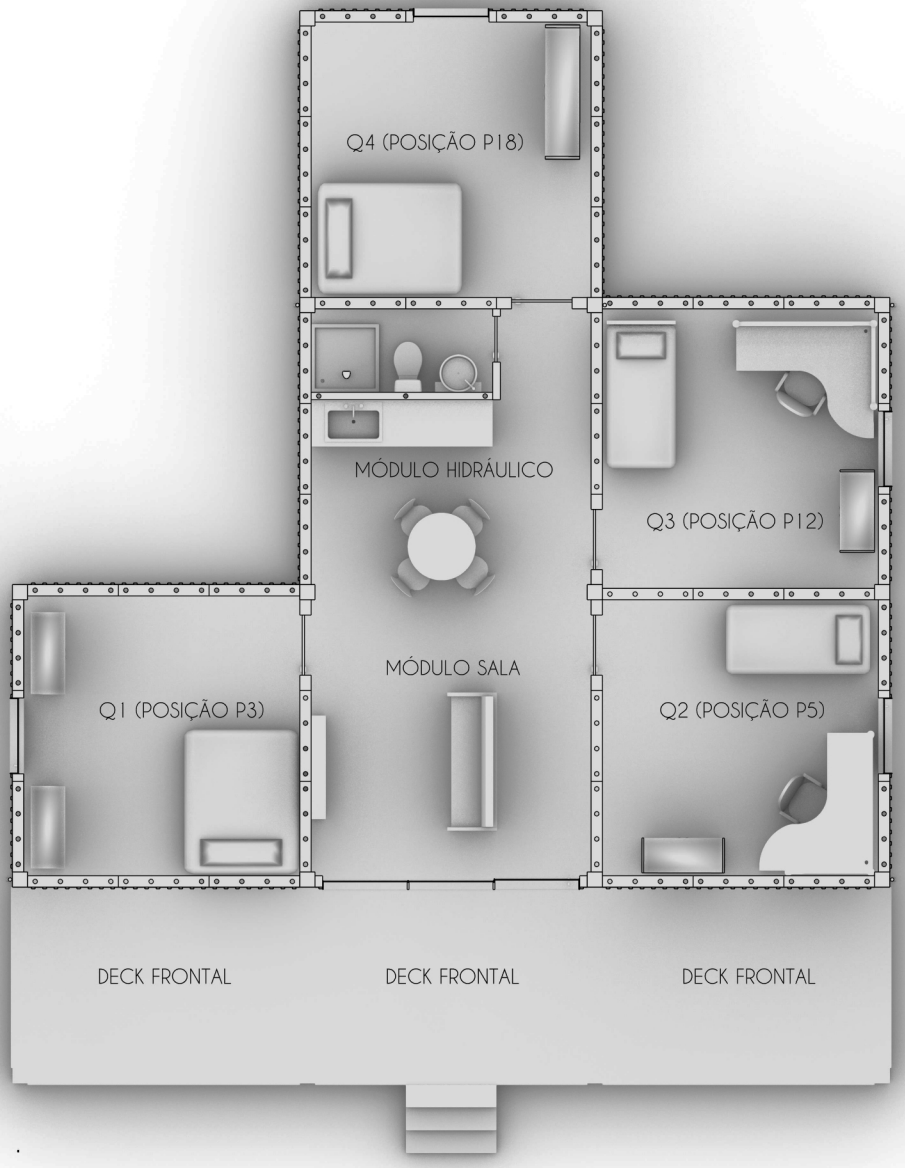


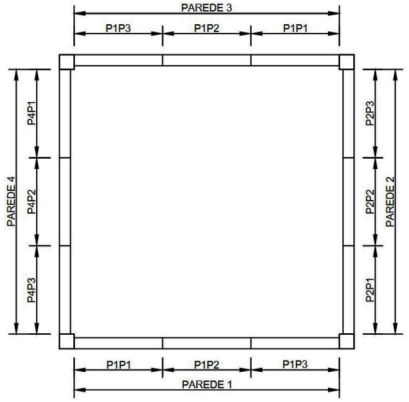
FACHADA ESQUERDA



FACHADA DIREITA

Habitação "T4"		
Projeto do Teste de Validação - DISS/MPRINCE		1:75
Fachadas E. e D.	U.PORTO FEUP FACULDADE DE ENGENHARIA UNIVERSIDADE DO PORTO	3/4
Autor: Guilherme Pires		





Esquema de posicionamento das paredes e painéis

Habitação "T4"		
Projeto do Teste de Validação - DISS/MPRINCE		1:100
Planta de piso	U.PORTO FEUP FACULDADE DE ENGENHARIA UNIVERSIDADE DO PORTO	4/4
Autor: Guilherme Pires		