

MESTRADO INTEGRADO
ARQUITETURA

Fotogrametria e Arquitetura

Transformando a Natureza em Ornamento

Francisco Scotti Campos Belo Afonso

M
2024



FOTOGRAMETRIA E ARQUITETURA

TRANSFORMANDO A NATUREZA EM ORNAMENTO

Dissertação de Mestrado Integrado em Arquitetura

Faculdade de Arquitetura da Universidade do Porto

Autor: Francisco Scotti Campos Belo Afonso

Orientador: Doutor Pedro Augusto de Azambuja Varela

Co-orientador: Professor Doutor José Pedro Ovelheiro Marques de Sousa

NOTAS PRÉVIAS

O corpo de texto foi escrito em língua portuguesa, ao abrigo do Novo Acordo Ortográfico. Relativamente às citações em línguas estrangeiras utilizou-se, sempre que necessário, uma tradução livre para uma leitura mais fluída. Algumas imagens referenciadas foram modificadas pelo autor e todas as imagens que não estão referenciadas foram produzidas pelo mesmo.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar o meu profundo agradecimento ao Professor José Pedro Sousa por me ter guiado numa fase inicial da dissertação e encaminhado para o meu orientador; À minha família, pelo apoio que me deu durante os meses de intensa dedicação a este trabalho; Ao Afonso, Filipe e Marina por me acolherem no Porto, possibilitando reuniões presenciais com o meu orientador; Ao Nuno, pelo empréstimo da máquina fotográfica, que permitiu um grande salto na qualidade das digitalizações; Ao laboratório FabLab em Lisboa pelo acolhimento e pelas ferramentas indispensáveis na realização das maquetes; E, por último, mas não menos importante, ao meu orientador, o Professor Pedro Varela, pela sua imensa disponibilidade e pelo conhecimento que compartilhou comigo ao longo deste trabalho.

RESUMO

A máquina, apesar de ter sido o principal fator de desornamentação da arquitetura no século XX, é hoje o mais importante catalisador da reornamentação. A arquitetura contemporânea tem recorrido à mimese neste processo, utilizando o computador para gerar formas naturais. Assim, levantou-se a hipótese de utilizar a digitalização tridimensional como um modo de trazer a natureza para a arquitetura. Dentro desta tecnologia existem muitas ferramentas, destacando-se a fotogrametria pela sua acessibilidade. Esta dissertação propõe analisar os benefícios da introdução da fotogrametria no processo criativo em arquitetura, utilizando a natureza como inspiração. Para tal, foram conduzidas várias experiências que traduziram elementos naturais em elementos arquitetônicos, utilizando diferentes técnicas de fabricação digital, como a impressão 3D, o corte a laser e a fresagem. A parte prática incidiu em 3 aspetos da morfologia do ornamento: volume, relevo e plano. Foram explorados diversos temas como o processamento e a interpretação de modelos 3D, a transformação de objetos em texturas e a relação entre a captura e a fabricação. Os resultados obtidos demonstram como a utilização da fotogrametria pode ser expandida na área de arquitetura, revelando a sua capacidade de transformar a complexidade da natureza em ornamento arquitetónico.

PALAVRAS-CHAVE

Digitalização Tridimensional; Fabricação Digital; Fotogrametria; Mimese; Não Padronização; Ornamento

ABSTRACT

Although the machine was the main factor in the de-ornamentation of architecture in the 20th century, today it is the most important catalyst for re-ornamentation. Contemporary architecture has resorted to mimesis in this process, using the computer to generate natural forms. We therefore hypothesised using 3D scanning as a way of bringing nature into architecture. Within this technology there are many tools, with photogrammetry standing out due to its accessibility. This dissertation aims to analyse the benefits of introducing photogrammetry into the creative process in architecture, using nature as inspiration. To this end, various experiments were conducted to translate natural objects into architectural elements, using different digital fabrication techniques such as 3D printing, laser cutting and milling. The practical part focused on three aspects of the ornament's morphology: volume, relief, and plane. Several topics were explored, such as processing and interpreting 3D models, transforming objects into textures and the relationship between scanning and manufacture. The results show how the use of photogrammetry can be expanded in the field of architecture, revealing its ability to transform the complexity of nature into architectural ornament.

KEYWORDS

3D Scanning; Digital Fabrication; Photogrammetry; Mimesis; Non-Standardization; Ornament

ÍNDICE

INTRODUÇÃO	1
1. ESTADO DA ARTE.....	3
1.1. COMPLEXIDADE E TECNOLOGIA	3
1.1.1. TENDÊNCIA PARA COMPLEXIFICAR	3
1.1.2. SIMPLIFICAR PARA COMPLEXIFICAR	5
1.2. DO ORNAMENTO AO ORNAMENTO	7
1.2.1. DECADÊNCIA DO ORNAMENTO TRADICIONAL	7
1.2.2. DESORNAMENTAÇÃO INEVITÁVEL	10
1.2.3. UM NOVO ORNAMENTO	13
1.3. ARTESANATO DIGITAL	18
1.3.1. ARQUITETO-ARTESÃO.....	18
1.3.2. ARTESÃO COM MÁQUINA	18
1.3.3. ARTESÃO DIGITAL.....	19
1.4. DIGITALIZAÇÃO COMO HIPÓTESE.....	21
1.4.1. NATUREZA E ARQUITETURA.....	21
1.4.2. BIOMORFISMO	23
1.4.3. DIGITALIZAÇÃO TRIDIMENSIONAL.....	27
1.5. CONCLUSÃO	28
2. FOTOGRAMETRIA	31
2.1. DIGITALIZAÇÃO COM FOTOGRAFIA	31
2.1.1. UMA TECNOLOGIA EMERGENTE	31
2.1.2. UMA TECNOLOGIA SUBAPROVEITADA	32
2.1.3. UMA TECNOLOGIA ACESSÍVEL	33
2.2. DO REAL PARA O DIGITAL.....	35
2.2.1. PROCESSO FOTOGRAMÉTRICO	35
2.2.2. TRATAMENTO DIGITAL	36
2.3. CONCLUSÃO	37
3. MATERIALIZAÇÃO	41
3.1. VOLUME.....	41
3.1.1. DIFERENTES MÉTODOS DE PRODUÇÃO.....	41
3.1.2. REINTERPRETAÇÃO DA ESCALA.....	43
3.2. RELEVO	47
3.2.1. COMPOSIÇÃO NATURAL.....	47
3.2.2. COMPOSIÇÃO ANALÓGICA.....	49
3.2.3. RELEVO COMO ESTRUTURA.....	51
3.3. PLANO	55
3.3.1. COMPOSIÇÃO DIGITAL.....	55
3.3.2. TRIDIMENSIONALIDADE PLANAR.....	56
3.4. CONCLUSÃO	60
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	63
REFERÊNCIAS	67
LISTA DE IMAGENS.....	73

INTRODUÇÃO

Após um século de arquitetura desornamentada, baseada na ideia de que “ornamento é crime”, os arquitetos contemporâneos parecem estar a valorizar novamente a ornamentação. O principal impulsionador deste fenômeno foi o desenvolvimento das tecnologias de fabricação digital. Contrariamente à máquina mecânica, a máquina digital possibilita a não padronização, o que é determinante para a produção de ornamento. Mas qual é a importância deste elemento na arquitetura?

O ser humano tem uma tendência para tornar mais complexo aquilo que domina. O mesmo sucede na arquitetura, muitas vezes expressando-se através do ornamento. Um exemplo disto foi a arquitetura da Grécia Antiga, quando uma mudança na técnica construtiva, passando da madeira para a pedra, marcou o início das ordens arquitetônicas que regravam a forma e o ornamento do edifício. Num primeiro momento, após a mudança de material, surgiu a ordem dórica, abstrata e minimalista, depois a ordem jônica, interpretativa e simples, e, por fim, a ordem coríntia, complexa e mimética. O ornamento tornou-se cada vez mais detalhado e realista, inspirando-se em elementos naturais como as folhas de acanto (Norberg-Schulz, 1980).

A complexificação da arquitetura pelo ornamento não foi um fenômeno exclusivo da Grécia Antiga, tendo acontecido recorrentemente ao longo da história da arquitetura. Contudo, pela padronização resultante da industrialização, o ornamento foi removido dos edifícios, desvalorizando o seu principal agente: o artesão. Apesar de no passado a ornamentação ter dependido do trabalho manual, a máquina digital pode executar a mesma tarefa. O artesanato contemporâneo baseia-se no domínio das ferramentas digitais e industriais (Sennett, 2009). Este fenômeno oferece ao arquiteto a possibilidade de se transformar num artesão, ornamentando as suas obras.

Contrariamente ao ornamento tradicional, o ornamento contemporâneo não está limitado às ordens arquitetônicas. A arquitetura de hoje tem a possibilidade de gerar complexidade através da ornamentação com poucas restrições. Porém levanta-se a pergunta: como ter complexidade e beleza? Apesar de parecer difícil conciliar os dois conceitos, a história da arquitetura mostra que a resposta a este problema pode estar na natureza. A

procura pela complexidade formal encontrou muitas vezes uma resposta em elementos naturais. Também hoje a arquitetura se inspira na natureza, mas utiliza o computador na criação destas formas.

Em alternativa, esta dissertação propõe explorar o potencial da fotogrametria como um modo de trazer as formas naturais para a arquitetura. Atualmente, esta tecnologia é utilizada em diversas áreas e para vários fins. Por exemplo, em engenharia é usada para estudar a deformação de materiais, em medicina para documentar o corpo de pacientes e em escultura para restaurar partes de estátuas (Luhmann, 2013). As principais aplicações da fotogrametria em arquitetura são o levantamento topográfico, documentação de edifícios e reparação de edifícios históricos, no entanto, esta praticamente ainda não foi utilizada como ferramenta de conceção.

Com este problema em mente, para esta dissertação foi proposto o objetivo de compreender e mostrar se a fotogrametria pode ser aplicada no processo criativo em arquitetura. O trabalho foi dividido em três partes: ESTADO DA ARTE, FOTOGRAMETRIA e MATERIALIZAÇÃO. No ESTADO DA ARTE, foi estudada a tendência ornamental e mimética da arquitetura contemporânea, sustentada pela não padronização, apresentando a digitalização tridimensional como uma tecnologia subaproveitada. Na parte seguinte, intitulada FOTOGRAMETRIA, destacou-se dentro da digitalização tridimensional a fotogrametria pela sua acessibilidade – esta consiste na digitalização de um objeto através de fotografias. Por último, na MATERIALIZAÇÃO, para testar a hipótese lançada na primeira parte e com base nos fundamentos tecnológicos da segunda parte, foram feitas várias experiências utilizando a fotogrametria como ferramenta criativa.

1. ESTADO DA ARTE

O Homem tem uma tendência para complexificar que se expressa na arquitetura através do ornamento. Todavia, o fenómeno de ornamentação foi interrompido várias vezes, como no século passado com a introdução da padronização industrial na construção. Com o surgimento da indústria não padronizada existe a possibilidade de reornamentação na arquitetura. Na sequência do aumento da automação e não padronização na contemporaneidade, o arquiteto tem a oportunidade de se tornar num artesão digital, dominando a ferramenta construtiva através do computador. No presente fenómeno de reornamentação, a natureza mantém-se como uma significativa fonte de inspiração e formas que imitam a mesma são geometricamente geradas. A digitalização tridimensional surge como uma ferramenta que possibilita a captura da complexidade da natureza sem a simplificação geométrica.

1.1. COMPLEXIDADE E TECNOLOGIA

A palavra “complexidade” e as suas variantes são incontornáveis e frequentemente utilizadas neste trabalho, pelo que se decidiu fazer um capítulo destinado à sua clarificação. Neste será apresentado o significado deste termo e o modo como está profundamente ligado à condição humana e, consequentemente, à arquitetura.

1.1.1. TENDÊNCIA PARA COMPLEXIFICAR

Complexidade, segundo o dicionário, é a qualidade do “que abrange ou encerra muitas coisas ou ideias” (Almeida Costa & Sampaio e Melo, 1996, p. 441). Tendo em conta esta definição, é possível afirmar que a evolução tecnológica é acompanhada de uma complexidade acrescida, uma vez que quanto mais tecnologicamente avançado um objeto é, mais repartido e múltiplo se torna. Como o Homem está num constante desenvolvimento tecnológico, provocado pelo “descontentamento sem fim que a tecnologia traz” (Kelly, 2016, p. 16), pode-se entender que existe uma tendência humana para complexificar.

O sociólogo e historiador Richard Sennet afirma que muitas vezes uma ferramenta criada para um certo fim, acaba por ser usada noutra totalmente distinto. Com o domínio do instrumento e com o desenvolvimento do mesmo este torna-se mais fácil de usar, permitindo um aumento de complexidade nas suas ações.

O bisturi, uma ferramenta simples, foi usado para fins altamente complexos no trabalho científico do século XVII, assim como a partir do século XV a chave de fendas plana; ambos começaram como ferramentas básicas. Estas conseguem realizar trabalhos complexos apenas porque nós, como adultos, aprendemos a explorar as suas possibilidades, em vez de considerar cada ferramenta como adequada para o propósito. (Sennett, 2009, p. 273)

O fenómeno de complexificação revela-se na Lei de Moore, a qual afirma que a quantidade de transístores em dispositivos eletrónicos com o mesmo preço iria duplicar, sucessivamente, a cada dois anos. Esta lei manteve-se mais ou menos verdadeira desde que foi introduzida em 1976 (Brynjolfsson & McAfee, 2014, p. 36). À medida que a sua complexidade aumentava, o computador pôde assumir tarefas cada vez mais difíceis. No entanto, o crescimento exponencial de transístores tem vindo a abrandar na última década. Os especialistas consideram que se está a chegar ao limite desta tecnologia e que, brevemente, se irá transitar para computadores quânticos, que não dependem de transístores. Esta mudança tecnológica revela a vontade do Homem em impedir a estagnação do seu desenvolvimento – quando uma técnica é dominada, é necessário explorar outra.

O desejo pela complexidade também está presente na arquitetura e não é um fenómeno contemporâneo, mas sim “(...) uma atitude comum (...) em arquitetos tão diversos como Michelangelo, Palladio, Borromini, Vanbrugh, Hawksmoor, Soane, Ledoux, Butterfield, alguns arquitetos do estilo *Shingle*, Furness, Sullivan, Lutyens e, recentemente, Le Corbusier, Aalto, Kahn e outros” (Venturi, 1977, p. 19). Para o arquiteto Robert Venturi, complexidade na arquitetura é fundamental. Esta deve levantar questões e estabelecer relações consigo mesma e com o seu contexto.

Segundo o arquiteto americano, Le Corbusier gerou complexidade nas suas obras através da ambiguidade e do paradoxo. A Villa Savoye (Fig. 1) em planta é um quadrado ou um retângulo? A Villa Shodhan é um cubo fechado (Fig. 2), mas simultaneamente aberto (Fig. 3)? Venturi também usa Michelangelo como exemplo, dizendo que este enriquece a sua arquitetura com ambiguidade e tensão. Na Biblioteca Laurenziana (Fig. 4), o arquiteto italiano parece ter desenhado mal as escadas da entrada. Todavia, quando estas são colocadas em contexto, o seu desenho é justificado pela escala dos espaços que conectam.

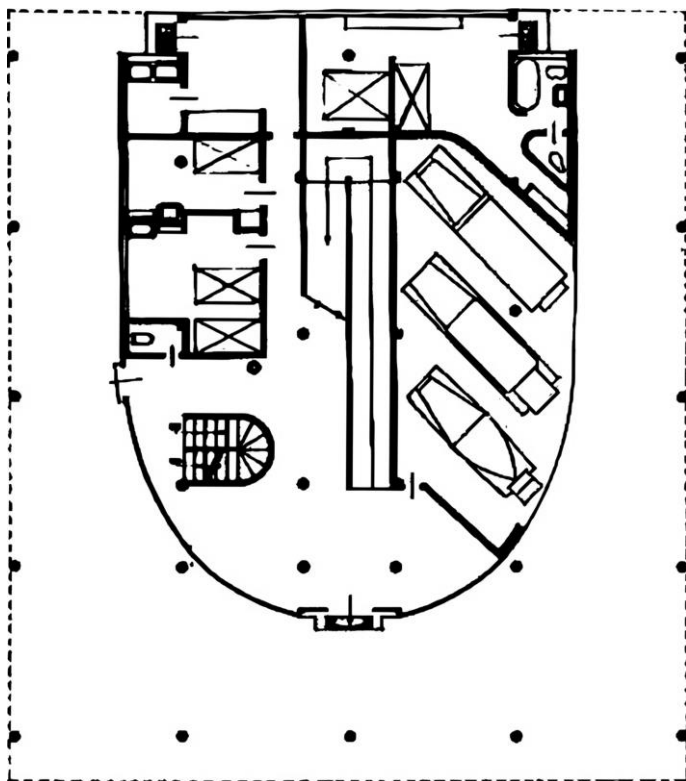


Fig. 1 Planta do piso térreo da Villa Savoye, Le Corbusier, 1931, Poissy (Venturi, 1977)



Fig. 2 Fachada frontal da Villa Shodhan, Le Corbusier, 1956, Ahmedabad (Emden, 2012)



Fig. 3 Fachada posterior da Villa Shodhan, Le Corbusier, 1956, Ahmedabad (Emden, 2012)

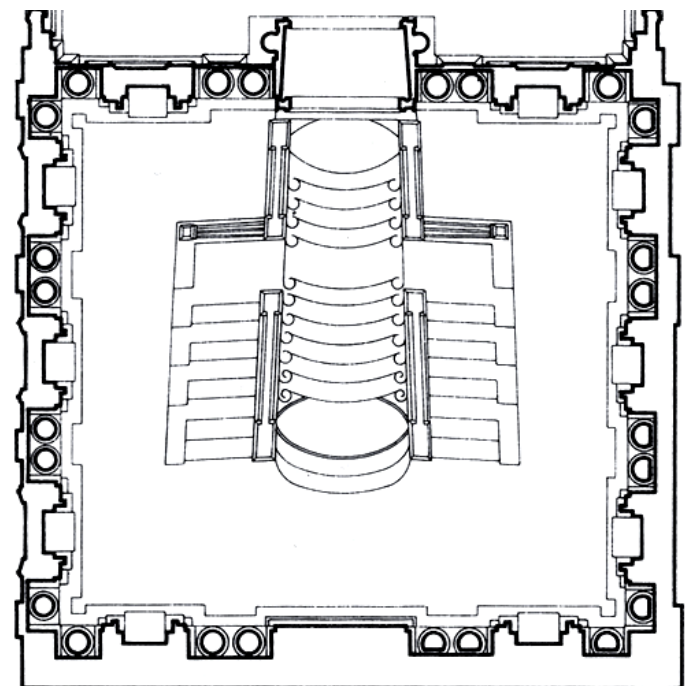


Fig. 4 Planta da Biblioteca Laurenziana, Michelangelo, 1571, Florença (Venturi, 1977)

A complexidade na arquitetura também se manifesta na função, pois os edifícios atuais têm de responder a programas cada vez mais extensos. Edifícios como hospitais, universidades e salas de concertos têm uma grande quantidade de requisitos a cumprir. Mesmo programas mais simples, como habitação, têm de obedecer a uma legislação progressivamente mais exigente. Ademais, na contemporaneidade, os edifícios estão mais equipados com tecnologia, como painéis solares ou sistemas AVAC.

Como tal, o historiador Geoffrey Scott considera a arquitetura “a mais complexa das artes” (1914, p. 2). Enquanto todas as áreas artísticas se preocupam com a *venustas*, a arquitetura, quase exclusivamente, tem de se preocupar com a *firmitas* e a *utilitas*. Ainda assim, a importância de cada um destes pontos foi mudando ao

longo da história da arquitetura. Como é natural, não é possível que a dedicação do arquiteto seja igualmente distribuída nestes três pontos – o Homem não consegue resolver todos os problemas simultaneamente, pois tem uma capacidade mental finita. Por esta razão, a complexidade na arquitetura deve ser vista como um recurso limitado que o arquiteto escolhe como gastar.

Nem todos os problemas podem ser resolvidos... De facto, é uma característica do século XX que os arquitetos sejam altamente seletivos na determinação dos problemas que querem resolver. Mies, por exemplo, faz arquitetura maravilhosa apenas porque ignora muitos aspetos de um edifício. Se ele resolvesse mais problemas, os seus edifícios seriam muito menos potentes. (Johnson et al., 1961, p. 51)

1.1.2. SIMPLIFICAR PARA COMPLEXIFICAR

Um marco significativo no desenvolvimento da humanidade foi a evolução das ferramentas. Estas servem como prolongamento do corpo humano, ampliando a capacidade de interagir com o mundo. Uma ferramenta tão simples como um martelo, multiplica exponencialmente as habilidades do Homem. O martelo pode ser substituído por uma pedra, mas não tem o mesmo conforto e precisão; ou pode ser substituído por um pregador pneumático, que aumenta a rapidez do trabalho. A criação e simplificação do uso de utensílios permite gerar complexidade. A evolução das ferramentas é possível graças à evolução dos métodos de produção. Por outras palavras, ferramentas desenvolvem ferramentas.

Ao longo da história da arquitetura, a evolução dos instrumentos desempenhou um papel fulcral. A Igreja Sant'Ivo alla Sapienza (Fig. 5) em Roma, projetada por Francesco Borromini em 1643, tem uma torre que "(...) não surgiu de uma de uma tradição de escultura ou de pintura, mas através da invenção de uma ferramenta do século XVI – o torno de madeira – que permitiu a realização desta forma" (Kolarevic & Klinger, 2013, p. 93). O mesmo sucedeu no início do século XX com a invenção do betão armado que, pelas suas características, permitiu gerar formas estruturalmente impossíveis até então.



Fig. 5 Torre da Igreja Sant'Ivo alla Sapienza, Francesco Borromini, 1660, Roma (Tokyorama, 2007)

Juntamente com os utensílios, um dos principais fatores de desenvolvimento da espécie humana foi a evolução da linguagem. A possibilidade de comunicar com o outro levou à acumulação e partilha de conhecimento adquirido. Na verdade, o arqueólogo Leroi-Gourhan considera que ambos estão intimamente ligados, afirmando que “o instrumento para a mão e a linguagem para a face são dois polos de um mesmo dispositivo” (1964, p. 34). Também no século passado houve necessidade de desenvolver uma linguagem, mas desta vez entre o Homem e o computador. Para além do problema da interação física, que resultou na criação do rato e do teclado, existia o problema da comunicação visual.

Nas fases iniciais do desenvolvimento dos computadores, estas máquinas eram exclusivas, complexas e reservadas a um número restrito de pessoas, que possuíam os conhecimentos necessários para as operar. A complexidade residia na compreensão do *hardware*, das linguagens de programação e dos métodos do processamento de dados. À medida que a tecnologia avançava,

os pioneiros reconheceram que, para aproveitar o verdadeiro potencial dos computadores, era crucial torná-los mais acessíveis e fáceis de utilizar.

A mesma tecnologia que simplifica a vida ao fornecer mais funções em cada dispositivo também complica a vida ao tornar o dispositivo mais difícil de aprender, mais difícil de utilizar. Este é o paradoxo da tecnologia e o desafio para o designer. (Norman, 2013, p. 57)

As interfaces gráficas do utilizador transformaram os computadores, de sistemas enigmáticos operados por especialistas, em ferramentas que podiam ser utilizadas por qualquer pessoa. A abstração de processos complexos por trás de ícones e botões visualmente apelativos simplificou as interações, democratizando o acesso ao poder da computação. Esta simplificação permitiu que indivíduos com diferentes formações e conhecimentos pudessem interagir com os computadores sem esforço, catalisando assim uma nova vaga de inovação. A interface atua como uma ponte, permitindo a exploração em novos domínios de complexidade.

As interfaces gráficas de utilizador tiveram um grande impacto no mundo da arquitetura. Ferramentas como a parametrização têm interfaces simples, o que facilita a sua utilização por parte de arquitetos sem um profundo conhecimento informático. Esta ferramenta consiste na criação de geometrias através de equações, as quais são controladas por parâmetros. A parametrização tornou-se acessível pela sua linguagem de programação visual: em vez de escrever comandos e equações em código-fonte, o utilizador consegue comunicar com o computador através de caixas, que contêm comandos e parâmetros, e fios, que correspondem às relações entre as caixas (Fig. 6).

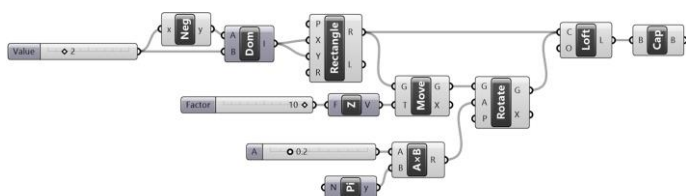


Fig. 6 Exemplo de programação visual no Grasshopper

Esta simplificação da programação permite gerar geometrias complexas com facilidade. O conjunto de instruções da Fig. 6 termina numa forma que resulta da ro-

tação e translação de um quadrado (Fig. 7). As superfícies curvas e complexas produzidas por este movimento são calculadas instantaneamente pelo computador.

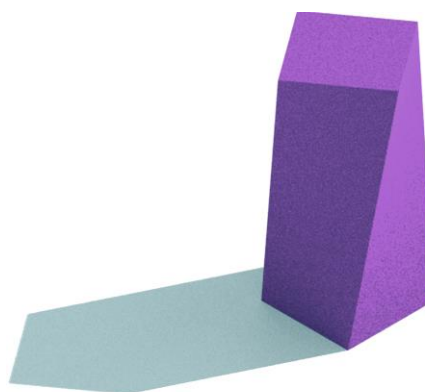


Fig. 7 Geometria resultante da rotação e translação de um quadrado

Também a interface dos programas 3D oferece uma pré-visualização instantânea e simplificada da realidade, permitindo um maior controlo no resultado do edifício. Ou mesmo o BIM (modelação da informação da construção) que, tal como a pré-fabricação, automatiza tarefas repetitivas e liberta a capacidade mental do arquiteto.

A análise do papel da complexidade ao longo da evolução tecnológica e arquitetónica revela uma constante busca humana por desafios e inovações. Desde a multiplicidade de funções em objetos tecnológicos até a ambiguidade na arquitetura, a complexificação é intrínseca à natureza humana. O desenvolvimento de ferramentas e a adaptação das interfaces gráficas exemplificam como a simplificação pode ser um catalisador para a exploração de novos domínios de complexidade. Assim, a complexidade não é apenas um fenómeno inevitável, mas também um recurso valioso que impulsiona a evolução e a superação de limitações, refletindo o constante desejo humano de avanço e inovação.

O desenvolvimento tecnológico revela que o Homem tem uma vontade inata de complexificar. A arquitetura é influenciada por este fenómeno de um ponto de vista estético, funcional e estrutural. Muitas vezes esta complexidade revela-se em pequenos detalhes do edifício, nos quais o arquiteto focou a sua atenção. A complexidade deve ser vista como um recurso finito que o arquiteto escolhe como gastar. O foco de complexidade num elemento do edifício, acrescentando-lhe valor, é muitas vezes feito em detrimento de outro elemento. A arquitetura beneficiou consideravelmente com a evolução das ferramentas digitais. Interações complicadas com o computador foram simplificadas, como o surgimento da

programação visual. A possibilidade de comunicar com o computador de um modo fácil e intuitivo, provocou uma grande complexificação na arquitetura, tanto em termos estéticos como estruturais.

Apesar de o ser humano ter uma tendência para complexificar, este fenómeno nem sempre é evidente. Os computadores são ferramentas cada vez mais complexas e, simultaneamente, mais acessíveis. Este fenómeno é explicado através da interface, que serve como uma ponte entre o utilizador e a ferramenta. A interface, que simplifica processos complexos, permite também ao utilizador enfrentar desafios ainda mais complexos. Assim, o desenvolvimento tecnológico, enquanto impulsiona a complexificação, também dá origem à simplificação, alimentando este ciclo de transformação. Richard Sennet resume bem este fenómeno, afirmando que “quanto melhor é a tecnologia, mais impossíveis são os critérios” (2009, p. 46).

1.2. DO ORNAMENTO AO ORNAMENTO

Como foi mencionado no capítulo anterior, a complexificação é inerente à condição humana e, por conseguinte, reflete-se na arquitetura. A complexidade manifesta-se frequentemente através do ornamento, pois este elemento oferece um momento de libertação formal – o ornamento é escultura dentro da arquitetura, logo não tem as mesmas condicionantes estruturais e funcionais. No século XX, este elemento praticamente desapareceu, havendo, no entanto, indícios de um reaparecimento da ornamentação na arquitetura contemporânea. Para uma compreensão mais esclarecida deste fenómeno, foi feita uma breve análise da presença e do tipo de ornamento ao longo da história, buscando compreender onde reside a complexidade do projeto em cada momento.

1.2.1. DECADÊNCIA DO ORNAMENTO TRADICIONAL

A ornamentação é um fenómeno que existe na arquitetura desde a antiguidade, sendo os primeiros registos do período neolítico com os petróglifos. Nas primeiras civilizações da Mesopotâmia já se ornamentavam as construções, tal como sucedeu mais tarde no Antigo

Egito. Também olhando para o passado clássico, rapidamente se reconhece a presença do ornamento na arquitetura. Num primeiro momento, a arquitetura da Grécia Antiga incluía ornamento, apesar de estar restrita a um conjunto de regras que produzia uma arquitetura simples, abstrata e geométrica. Segundo Vitruvius, a ordem dórica surgiu após uma mudança na técnica construtiva: os principais edifícios gregos, os templos, que até então eram construídos em madeira, passaram a ser construídos em pedra. Como resultado, alguns elementos da estrutura em madeira foram transferidos para os elementos em pedra como ornamento (1960, p. 133).

Mesmo sendo escasso, o ornamento aparecia em alguns elementos como o relevo do fuste, remetendo ao tronco de uma árvore, ou o friso com imagens mitológicas. Temas de um elevado detalhe, como o espaçamento dos triglifos, revelam uma complexidade escondida. Venturi reforça esta ideia ao afirmar que a aparente simplicidade da ordem dórica deriva da sua complexidade geométrica.

A simplicidade visual do templo dórico é alcançada através das famosas sutilezas e precisão da sua geometria distorcida, e das contradições e tensões inerentes à sua ordem. O templo dórico pode atingir uma simplicidade aparente por meio de uma complexidade real. (Venturi, 1977, p. 17)

Uma vez dominadas as proporções, a arquitetura grega evoluiu – mantendo como base o dórico, procurou-se complexificar adicionando detalhe. Ao contrário da coluna dórica, “a coluna jónica está apoiada numa base própria e um esbelto fuste culmina num capitel de volutas que, como um pergaminho, suporta o peso leve de um entablamento baixo” (Norberg-Schulz, 1980, p. 27). Assim, uma maior leveza estrutural e a introdução de novos elementos arquitetónicos conduziram a um aumento da complexidade. A principal diferença ocorreu no capitel com a introdução das volutas, cujo desenho provavelmente resultou de uma interpretação geométrica, matemática e bidimensional de algo encontrado na natureza.

Por fim, como uma evolução da ordem jónica, surgiu a ordem coríntia. Vitruvius atribuiu a invenção desta ordem no seu quarto livro, *Da Arquitetura*, a Calímaco, escultor grego que se terá inspirado numa oferenda sobre uma sepultura na forma de um cesto com folhas de acanto

(1960, p. 129). Possivelmente, um aumento do domínio da técnica por parte do artesão tenha retirado a necessidade de simplificar a forma dos elementos naturais para reproduzi-los. A verdade é que a vontade de complexificar fez com que as volutas geométricas e bidimensionais do jónico evoluíssem para folhas de acanto realistas e tridimensionais no coríntio, nas quais são reconhecíveis pequenas volutas (Fig. 8). Esta nova ordem aumentou uma dimensão à leitura do capitel, simultaneamente simplificando o seu desenho – o capitel jónico necessitava de dois alçados para ser construído, enquanto o capitel coríntio precisava apenas de um.

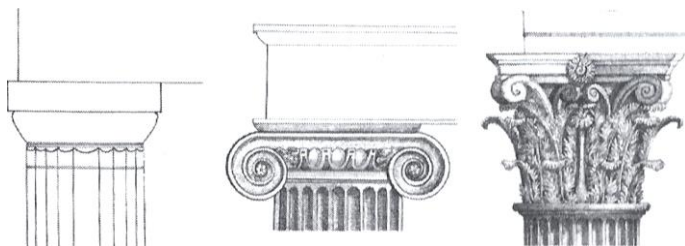


Fig. 8 Capiteis gregos da ordem dórica, jónica e coríntia, respetivamente (Escudero et al., 2014)

O mesmo fenómeno ocorreu por volta do século XV na península itálica, quando o Renascimento provocou um abrandamento na influência do dogmatismo religioso sobre a cultura e uma valorização da antiguidade clássica. Esses valores foram incorporados na arquitetura, que passou por profundas alterações, incluindo a reintrodução das ordens clássicas e a adoção de um desenho mais regrado. A arquitetura renascentista pode ser entendida como uma continuação da arquitetura romana, como se a disciplina tivesse sido interrompida durante a era medieval. O ornamento denso e complexo do estilo anterior, o gótico, transformou-se num ornamento pontual e simples no Renascimento, onde se concentrou a complexidade. Venturi usa como exemplo a pilastra que, na arquitetura renascentista, tanto pode ser um elemento estrutural, simbolicamente estrutural ou composicionalmente ornamental (1977, p. 35).

Com o domínio desse novo modo de construir, os arquitetos começaram a questionar a integridade dos elementos clássicos e a importância das regras na arquitetura, resultando no movimento maneirista. Este caracterizou-se por uma interpretação e subversão dos mesmos elementos, provocando uma libertação parcial da arquitetura regrada. Os edifícios produzidos neste período, embora ainda vinculados à antiguidade clássica, incorporavam jogos espaciais e elementos inesperados que desafiavam as convenções da arquitetura renascentista. Isto é reconhecível em vários elementos do

Palazzo del Te (Fig. 9), desenhado por Giulio Romano, como a arquitrave interrompida na fachada do pátio.

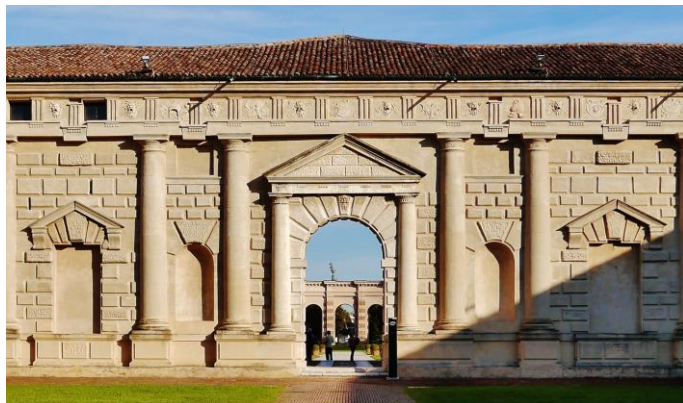


Fig. 9 Fachada do pátio do Palazzo del Te, Giulio Romano, 1534, Mântua (Zairon, 2018)

Por fim, chegou-se ao barroco, caracterizado por uma significativa libertação das regras e exploração do desenho do espaço e do ornamento. Para o historiador Geoffrey Scott, vastas igrejas barrocas parecem íntimas em escala porque as suas paredes ondulantes e ornamento simulam os movimentos do corpo humano (Scott, 1914).

O desenvolvimento da arquitetura nestes dois períodos, Grego e Renascentista, evidencia uma complexificação crescente. Tanto o capitel grego como as formas barrocas tornaram-se cada vez mais intrincados, culminando na mimese. O fenómeno de complexificação e ornamentação é recorrente em vários períodos da história. O mesmo aconteceu no Império Romano, da ordem toscana até ao bizantino, ou na Idade Medieval, começando no românico e acabando no gótico.

Mais recentemente, o panorama mudou drasticamente com a Revolução Industrial. A energia a vapor impulsionou uma mudança tão significativa que definiu, segundo Brynjolfsson e McAfee, a "primeira idade da máquina" (2014, pp. 10–11) e uma transformação profunda da humanidade. O crescente domínio da máquina levou à padronização que afetou várias disciplinas, incluindo a arquitetura. Por dificultar a fabricação, as peças padronizadas gradualmente deixaram de ter detalhes ornamentais. Ainda assim, ao longo do século XIX, houve tentativas de preservar o ornamento na arquitetura através da sua massificação. A pré-fabricação destes elementos possibilitou alguma independência da mão de obra artesanal, facilitando a sua produção.

Até então, o ornamento era algo único e difícil de executar, resultando de uma colaboração entre várias partes: arquitetos, escultores e pintores deviam trabalhar em sintonia para produzir um edifício coeso. Além disso, o artesão deixava as suas imperfeições marcadas na peça produzida. Ao ser padronizado e produzido em massa, o ornamento acabou por perder sua singularidade e expressão, levando à sua desvalorização (Picon, 2013, p. 48).

Tentando recuperar a essência do ornamento, ainda no século XIX, surgiu o movimento *Arts & Crafts*, valorizando a não padronização através do trabalho artesanal. John Ruskin, o crítico de arte que inspirou este movimento, condenava o industrialismo do século XIX pela utilização em massa de moldes na produção de ornamento. A moldagem industrial consistia em dois tipos de trabalho: por um lado o trabalho criativo de esculpir a forma original e o seu molde negativo consequente; e, por outro, o trabalho mecânico de fundir e moldar. Segundo Ruskin, através deste método de produção, o trabalho criativo era desvalorizado por ser completamente superado, em termos de quantidade, pelo trabalho mecânico. A sua crítica aplicava-se principalmente ao problema da cópia e à consequente falta de diversidade (1840, pp. 64–66).

O manifesto de Ruskin gerou o movimento *Art Nouveau* na arquitetura no final do século XIX. Arquitetos como Louis Sullivan e Victor Horta exploraram uma nova ornamentação, encontrando um equilíbrio entre o industrial e o artesanal – uma combinação de elementos produzidos pela máquina e pelo artesão. Na Casa Horta, em Bruxelas, reconhecem-se peças únicas e produzidas artesanalmente, como o corrimão de madeira da escadaria principal (Fig. 10), enquanto outras peças são evidentemente repetidas e fabricadas industrialmente, como o gradeamento da varanda (Fig. 11). Estes arquitetos já se tinham afastado do ornamento tradicional, apenas reinterpretando um ou outro elemento clássico, como os capitéis e o entablamento reconhecíveis no Wainwright Building (Fig. 12) ou as mísulas na Casa Horta (Fig. 11).



Fig. 10 Detalhe do corrimão na Casa Horta, Victor Horta, 1901, Bruxelas (Soldo, 2022)

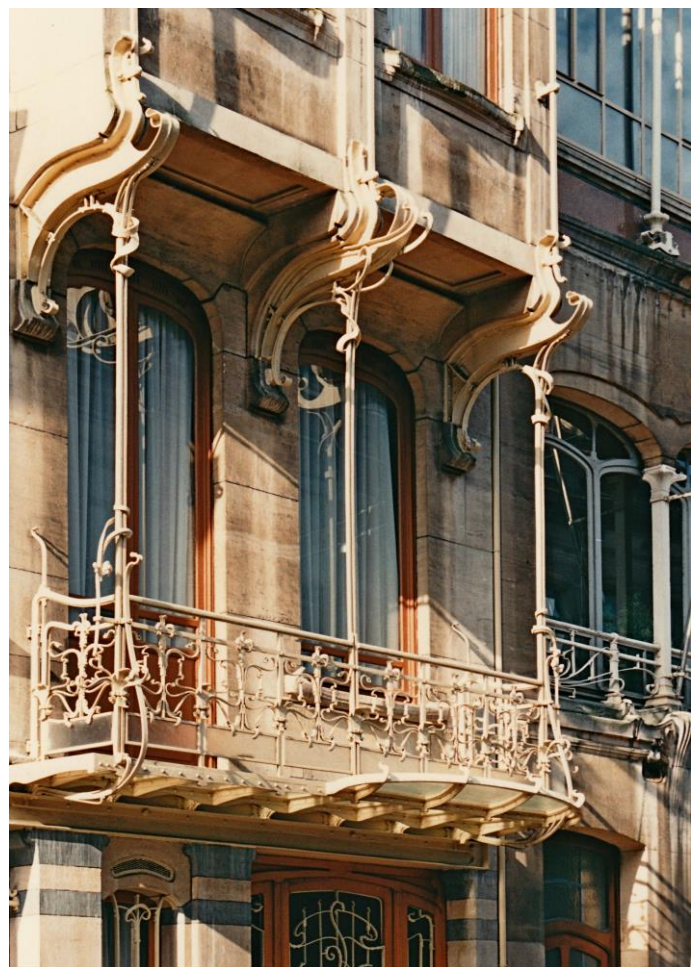


Fig. 11 Fachada da Casa Horta, Victor Horta, 1901, Bruxelas (EmDee, 1988)



Fig. 12 Fachada do Wainwright Building, Louis Sullivan, 1891, Saint Louis (University of Missouri, 2011)

1.2.2. DESORNAMENTAÇÃO INEVITÁVEL

À medida que os edifícios se tornavam mais padronizados e pré-fabricados, havia também menos condições para adicionar elementos ornamentais ou não padronizados. Em vez disso, os arquitetos começaram a concentrar-se maioritariamente na funcionalidade e espacialidade dos edifícios, usando materiais e tecnologias prontamente disponíveis e fáceis de produzir.

As opiniões de Adolf Loos sobre ornamentação na arquitetura, apesar de totalmente diferentes do movimento *Arts & Crafts*, também podem ser vistas como uma reação ao fenómeno de massificação do ornamento. Segundo Loos, esta ornamentação era superficial e uma distração do verdadeiro objetivo da arquitetura, que seria um propósito funcional e prático. Como tal, a ornamentação representaria uma luta inútil contra a força inevitável da máquina.

Loos argumentava que o ornamento era um sinal de atraso cultural e um resquício de sociedades mais primitivas (1898, p. 53). À medida que as sociedades pro-

grediam e se tornavam mais avançadas tecnologicamente, também se deveriam afastar da ornamentação e aproximar da simplicidade e da funcionalidade, afirmando que “a evolução da cultura é sinónimo de remoção do ornamento dos objetos utilitários” (1908, p. 97). No entanto, como referenciado anteriormente, ao longo da história da arquitetura ocidental, vários períodos de inovação e desenvolvimento caracterizaram-se por uma ornamentação crescente, evidenciando o fenómeno contrário.

Loos defendia também que a ornamentação era trabalho desperdiçado e, como tal, um crime em si. Não só a mão de obra, mas também o dinheiro e o material que eram gastos poderiam ser usados de um modo mais eficiente. De facto, manter uma arquitetura baseada no artesanato seria lutar contra o inevitável domínio da máquina. Loos acrescenta que o ornamento sofria da rotatividade das modas, levando a uma desvalorização prematura do produto do trabalho (1908, pp. 99–101). A sua crítica era direcionada principalmente ao ornamento tradicional e ao quão desconectado este estava da sociedade contemporânea. Mesmo assim, as suas obras não eram totalmente desornamentadas, como se pode ver no Bauer Château (Fig. 13) – na sala principal, o mármore contrasta com o gesso e surgem elementos decorativos como os frisos e os candelabros.

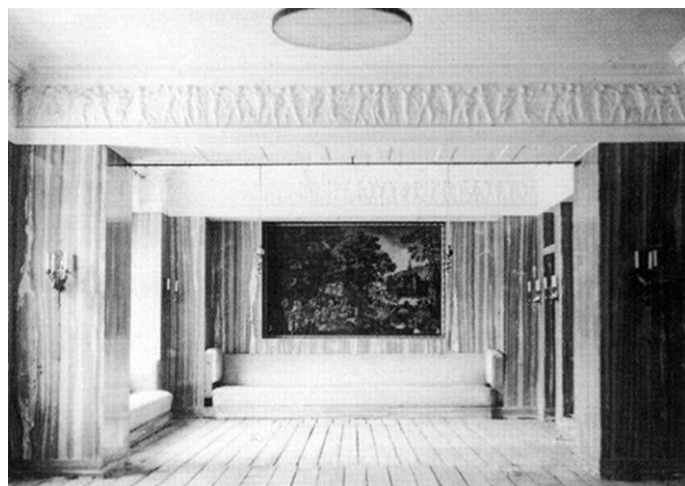


Fig. 13 Sala principal do Bauer Château, Adolf Loos, 1925, Brun (Bauer, sem data)

Efetivamente, as ideias de Loos acabaram por se realizar e tiveram um impacto fundamental no desenvolvimento da arquitetura. A sua visão influenciou o movimento moderno, particularmente a escola Bauhaus que, tal como Loos, enfatizou a funcionalidade e a simplicidade, desvalorizando a ornamentação e realçando a ideia de que “a forma segue a função” (Sullivan, 1896, p. 408). Apesar de ter criado esta máxima, Louis Sullivan valorizava o ornamento, algo evidente em várias das

suas obras e que contraria de certo modo o próprio movimento que gerou. Observe-se o que Picon resume sobre este assunto:

Até ao início do século XX, o ornamento permaneceu, aos olhos de muitos arquitetos, um complemento essencial do tectônico. A arquitetura moderna arruinou esta concepção, despromovendo-o para o estatuto de mero acessório – as penas do chapéu de Le Corbusier. (2013, pp. 40–41)

O arquiteto Lars Spuybroek considera que o desaparecimento do ornamento na arquitetura moderna deveu-se essencialmente à passagem do desenho da superfície para a composição de volumes. A transição foi influenciada pela necessidade de acomodar uma população crescente e de produzir edifícios em maior quantidade. O volume tornou-se uma preocupação central devido à industrialização da sociedade, que necessitava de massas homogêneas e produzidas por máquinas, o que contrastava com as superfícies intrincadas do ornamento (2016, p. 85).

No século XX ocorreu uma passagem do ornamento para a textura, que se inspirava na estética wabi-sabi* e utilizava materiais desprovidos de ornamentação. Segundo Spuybroek, esta transição não foi benéfica, conduzindo à ausência de “simpatia” na arquitetura, um conceito central na estética de Ruskin. Para este, a beleza incluía sempre variação, imperfeição e fragilidade, três conceitos que desapareceram totalmente no século XX. As texturas naturais utilizadas no movimento moderno não geravam a geometria ou os padrões tessellados essenciais para a arquitetura. A verdadeira simpatia do projeto exigia a transformação das texturas naturais em formas artificiais intencionais.

Apesar desta mudança na pele da arquitetura, a vontade de complexificar continuou a existir, manifestando-se através do volume. Tal é visível na forma em espiral do Museu Guggenheim de Nova Iorque (Fig. 14) ou na Capela de Notre-Dame-du-Haut (Fig. 15), com as suas paredes curvas e aberturas aleatórias.



Fig. 14 Museu Guggenheim, Frank Lloyd Wright, 1939, Nova Iorque (Suresh, 2019)



Fig. 15 Capela de Notre-Dame-du-Haut, Le Corbusier, 1955. Ronchamp (Stearns, 2012)

Mesmo no movimento moderno mais racional, a complexidade permanecia. Arquitetos como Mies van der Rohe concentraram a complexidade da sua arquitetura no pormenor construtivo. O pilar cruciforme do Pavilhão de Barcelona (Fig. 16) revelava um cuidado e detalhe muito próprio do ornamento. “Menos é mais” apenas na forma, mas não no detalhe. Ou como afirma Sennet, “as soluções fáceis e simples escondem muitas vezes a complexidade” (2009, p. 222).



Fig. 16 Perfil do pilar do Pavilhão de Barcelona, Mies van der Rohe e Lilly Reich, 1929, Barcelona (Adams, 2004)

* Na estética tradicional japonesa, o wabi-sabi (侘寂) é uma visão do mundo centrada na aceitação da precariedade e da imperfeição. As suas características e princípios incluem a assimetria, a rugosidade, a simplicidade, a economia, a austeridade, a modéstia, a intimidade e a valorização dos objetos naturais e das forças da natureza.

Venturi tentou combater a simplicidade estética do estilo internacional ao criar a máxima “*less is a bore*” (1977, p. 17), que impulsionou o pós-modernismo. A sua

arquitetura acabou por ter um foco na complexidade volumétrica, semelhante à de Le Corbusier. Os seus projetos focaram-se na disposição de elementos tridimensionais e não na própria superfície, ao que ele chama de “composicionalmente ornamental”. Esta preocupação volumétrica é evidente tanto na sua obra construída como escrita. Em *Complexidade e Contradição na Arquitetura*, os exemplos de complexidade com os quais somos confrontados são muitas vezes volumétricos: a incerteza sobre a dimensão dos volumes laterais do Castelo Grimsthorpe (Fig. 17), que resulta de um jogo perspético; ou a desproporcionalidade do Campanário de Bruges (Fig. 18) em relação à praça imediata, que se compreende quando este é visto de longe.



Fig. 17 Fachada a norte do Castelo Grimsthorpe, John Vanbrugh, 1819, Lincolnshire (as-toft.com, 2001)



Fig. 18 Campanário de Bruges, 1240, Bruges (Staudt, 2008)

Mesmo quando o ornamento aparece nas suas obras, tem quase sempre uma aplicação volumétrica, como a Casa Vanna Venturi em forma de frontão interrompido. Em termos de superfícies ornamentadas, Venturi e Mies são muito semelhantes, valorizando a textura natural

dos materiais. O banco de mármore verde do Edifício Seagram (Fig. 19) corresponde a um pilar de granito preto polido na Guild House (Fig. 20).



Fig. 19 Praça e banco em frente ao Seagram Building, Mies van der Rohe e Philip Johnson, 1958, Nova Iorque (RJS, 2018)



Fig. 20 Entrada da Guild House, Robert Venturi, 1963, Filadélfia (Schulman, 2012)

1.2.3. UM NOVO ORNAMENTO

Tal como a ordem dórica abstrata se transformou na ordem coríntia mimética, ou tal como a arquitetura renascentista regrada se transformou em arquitetura barroca sinuosa, também hoje se sente a mesma transição. A arquitetura do século XX, muito influenciada pela padronização industrial, ganhou um caráter semelhante à ordem dórica e à arquitetura renascentista. Por outro lado, em pleno século XXI, já se começam a observar algumas tendências coríntias e barrocas na arquitetura. No entanto, a ornamentação contemporânea é bastante diferente daquela baseada nos princípios vitruvianos utilizada até ao final do século XIX.

Spuybroek afirma que no início do século XXI, é difícil compreender a forte diferença em relação ao passado, quando as superfícies dos objetos eram adornadas. Existe uma grande familiaridade da geração atual com superfícies lisas e nuas em objetos do quotidiano - paredes, carros, aparelhos eletrónicos e outros. A prevalência de objetos lisos, polidos e não decorados contrasta fortemente com as sensibilidades ornamentais do passado (2016, p. 84). O autor complementa que o ornamento desempenha um papel importante no modo como nos relacionamos com o mundo ao estabelecer uma continuidade entre seres e objetos. A necessidade de ornamento não é apenas histórica ou cultural, fazendo parte da essência da experiência humana. Num mundo onde a nudez prevalece, o ornamento torna-se um meio de cobrir, texturar e incrustar o que nos rodeia, acrescentando profundidade e riqueza. Para Spuybroek, esta necessidade de ornamento é mais crucial do que nunca (2016, p. 99).

O ornamento foi um elemento fundamental também fora da arquitetura - o vestuário, por exemplo, sempre esteve associado ao adorno. Segundo Leroi-Gourhan, existem poucos exemplos de peças de roupa da antiguidade desenhadas meramente para serem funcionais. Mesmo excluindo adereços, as roupas tinham cores, formas e decorações influenciadas por um gosto estético (1994, p. 140).

A ornamentação não só se tornou uma necessidade, como também se tornou novamente possível graças ao desenvolvimento tecnológico. A era da máquina mecânica está a mudar para a era da máquina digital, ou seja, a “segunda idade da máquina” (Brynjolfsson & McAfee,

2014). De facto, nos últimos anos tem havido uma tendência para a não padronização na arquitetura – em vez de utilizar elementos padronizados e materiais de construção produzidos em massa, procura-se cada vez mais criar edifícios únicos e ornamentados. A máquina, apesar de ter sido o principal fator de desornamentação da arquitetura do século passado, é hoje o mais importante catalisador da ornamentação.

Com a evolução dos computadores surgiram novos modos de projetar que possibilitam uma complexidade acrescida. O CAD (desenho assistido por computador) trouxe a possibilidade de pré-visualizar e modelar um objeto de um modo rápido e rigoroso ou dar informações diretamente às máquinas que o fabricam.

A evolução do CAD revela um interesse crescente em direção ao estudo e à aplicação do potencial do digital, oferecendo maneiras de explorar e controlar geometrias cada vez mais complexas e não uniformizadas. (Malé-Aleman & Sousa, 2005, p. 451)

Desde que foi inventado por Ivan Sutherland em 1963, o CAD tem-se tornado cada vez mais acessível. Atualmente esta tecnologia tem-se desenvolvido em direção à parametrização, com ferramentas como Grasshopper do Rhino 3D. Esta oferece aos arquitetos a possibilidade de não só criar formas com um elevado grau de complexidade com relativa facilidade, como também desconstruir as mesmas em várias peças, facilitando a sua materialização. Ademais, o desenvolvimento da tecnologia BIM permite que arquitetos, engenheiros e construtores colaborem e coordenem os seus esforços de forma mais eficaz, facilitando a execução de projetos de elevada complexidade. Com o aumento da automação em arquitetura, os arquitetos têm mais tempo para pensar o projeto, potencializando a ornamentação.

Nos dias de hoje, impressoras 3D criam estruturas de metal com rigor e alguma independência de mão de obra (Fig. 21); braços robóticos possibilitam a disposição de elementos padronizados, como tijolos, de um modo não padronizado (Fig. 22); e punçoneiras cortam e deformam painéis com diversos padrões (Fig. 23). Estas tecnologias, entre outras não mencionadas, permitem a fabricação digital, ou seja, o processo de conceção e produção que combina a modelação 3D, através do CAD, com a fabricação aditiva ou subtrativa. Estes termos referem-se, respetivamente, a tecnologias como

a impressão 3D, que adiciona material, e a fresagem, que remove material.

De facto, as tecnologias modernas de fabricação digital permitem produzir facilmente formas com uma complexidade geométrica que é inatingível por outros métodos. (Bickel et al., 2018, p. 1)



Fig. 21 Inauguração da Ponte MX3D, MX3D, 2021, Amsterdão (de Groot, 2021)



Fig. 22 Adega Gantenbein, Gramazio & Kohler e Bearth & Deplazes Architekten, 2006, Suíça (Feiner, 2012)

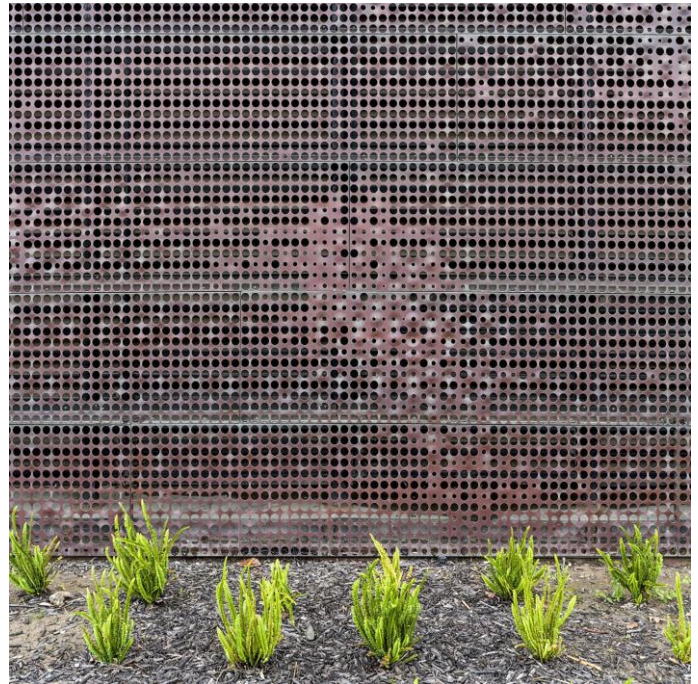


Fig. 23 Detalhe dos painéis da fachada do De Young Museum, Herzog & de Meuron, 2005, São Francisco (Marburg, 2016)

A fabricação digital oferece a possibilidade de romper com as cópias idênticas no projeto e na execução. Esta combina a eficiência industrial com a variabilidade presente no artesanato. Neste contexto, o código digital, semelhante ao código genético, atua como um conjunto de instruções para modular a matéria, ativando e inibindo processos de forma variável.

Como referido anteriormente, John Ruskin tinha uma forte aversão às máquinas, especialmente aquelas que produziam uniforme e repetidamente. As máquinas que ele desprezava criavam objetos idênticos, como perfis em vigas ou ornamentação com ferro fundido. No entanto, "as máquinas digitais são diferentes - elas prosperam com a diferença. São algo completamente distinto" (Spuybroek, 2016, p. 61). Spuybroek considera que na arquitetura contemporânea a criatividade reside no controlo dos processos de produção e que a qualidade resulta da própria modelação.

Técnicas avançadas de fabricação permitem produzir ornamento sem a necessidade de artesãos tradicionais. Consequentemente, existe potencial de tornar a ornamentação mais viável em termos de custo e eficiência, pois estas técnicas reduzem a necessidade de processos trabalhosos e permitem a produção de elementos não padronizados em maiores quantidades. Logo, contrariamente ao que Loos escreve em 1910, o ornamento deixa de ser um desperdício de mão de obra, pois pode ser realizado pela máquina.

Por causa destes fatores, a arquitetura contemporânea tem-se reornamentado, mas com um ornamento diferente daquele produzido até ao final do século XX. O ornamento tradicional foi quase sempre pensado como uma camada suplementar ao edifício. Mesmo sendo muito abundante, este tinha de respeitar várias regras e devia reforçar e manter os ritmos da ordem arquitetónica. Geoffrey Scott dá como exemplo o barroco que, “(...) tal como a natureza, é fantástico, inesperado, variado e grotesco. É tudo isto no mais alto grau. Mas, ao contrário da Natureza, permanece rigidamente sujeito às leis da escala e da composição” (1914, p. 86).

Na verdade, o ornamento nunca foi algo aleatório, mas sim uma linguagem, ou seja, um conjunto de regras que permitia a comunicação entre artista e utilizador/observador. A própria palavra ornamento partilha uma origem etimológica com a palavra ordem – do latim *ornamentum*, que tem as suas raízes etimológicas no termo *ordo*. Por esta razão, o significado da palavra latina *ornamentum* está próximo do grego *kosmos*, que pode significar a beleza resultante de uma disposição ordenada (Picon, 2013, pp. 35–37).

Antoine Picon organiza a função do ornamento tradicional em 3 pontos: prazer, distinção social e transmissão de conhecimento (2013, p. 50). Muitas vezes era apenas o ornamento que fazia a distinção entre um edifício autoral ou anónimo. Ao contrário da arquitetura até ao final do século XIX, o ornamento contemporâneo tende a concentrar-se na fachada, não se alastrando para o resto do edifício. Esta concentração no exterior pode ter sido causada por fatores como uma menor especialização dos edifícios, que resulta em interiores cada vez mais versáteis e menos fixos e, consequentemente, menos ornamentados. Picon afirma também que na arquitetura contemporânea o ornamento está muitas vezes embutido no edifício, partilhando as mesmas peças que a construção, enquanto tradicionalmente o ornamento era independente do próprio edifício.

“É como se o ornamento estivesse a contar a estrutura em vez de jogar o jogo complexo de complementação da mesma.”
(2013, p. 42)

Spuybroek discorda desta visão, afirmando que a arquitetura contemporânea está a sofrer com o “barroco digital” (2016, p. 73). A seu ver, as construções atuais estão longe do gótico, não passando de caixas decoradas.

O ornamento contemporâneo difere também do tradicional por não ter uma forte dimensão figurativa ou simbólica. Este caracteriza-se pelo que Picon chama de “política do efeito”, ou seja, uma ornamentação virada para a estimulação sensorial do utilizador/observador. O ornamento contemporâneo é comparado às experiências dos anos 50 e 60, da arte cibernética à arte ótica (Fig. 24), que visavam estimular vários sentidos simultaneamente (2013, p. 133). Picon divide a ornamentação da arquitetura contemporânea em três tipos frequentemente utilizados: a textura, que se materializa na forma de uma imagem bidimensional (Fig. 25); o padrão, que se assemelha a uma tesselação (Fig. 26); e a topologia, em que o próprio movimento do edifício é o ornamento que, como uma fluidez barroca, provoca geometrias complexas (Fig. 27).

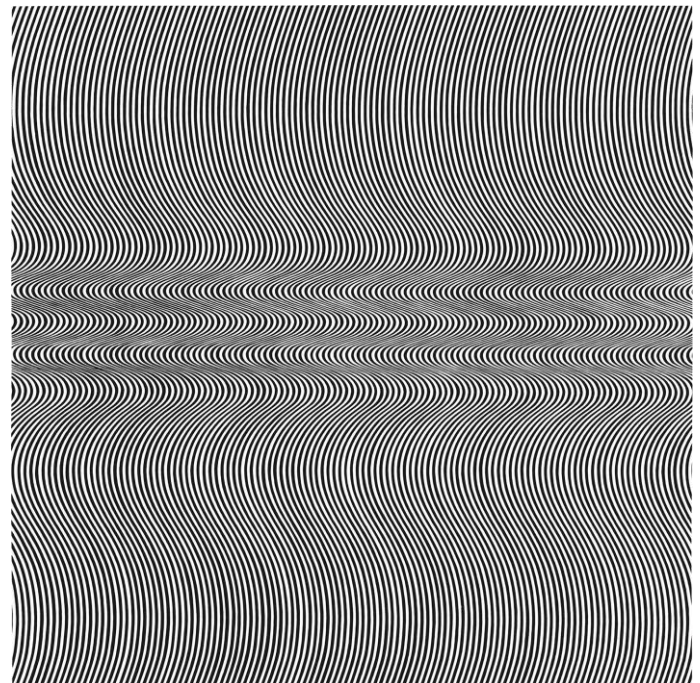


Fig. 24 *Current*, Bridget Riley, 1964 (Riley, 1964)

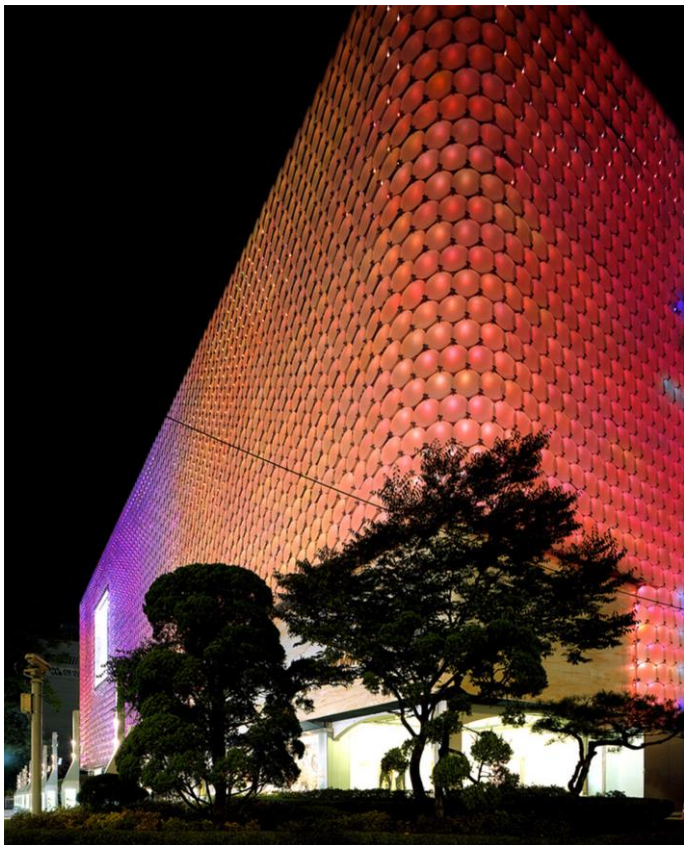


Fig. 25 Fachada que muda de cor da Galleria Department Store, UNStudio, 2004, Seul (Richters, sem data)

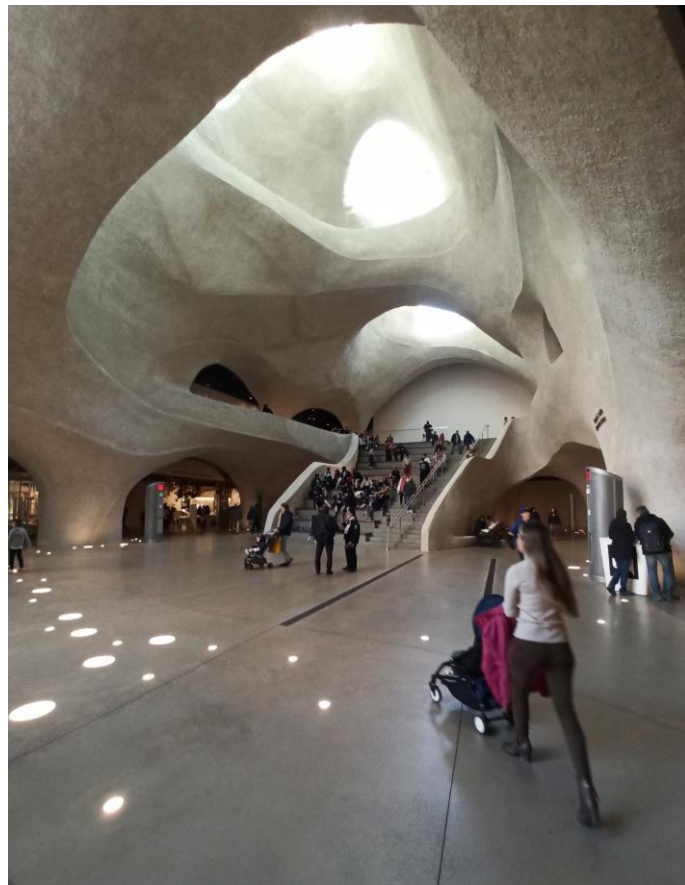


Fig. 27 Richard Gilder Center, Studio Gang, 2023, Nova Iorque

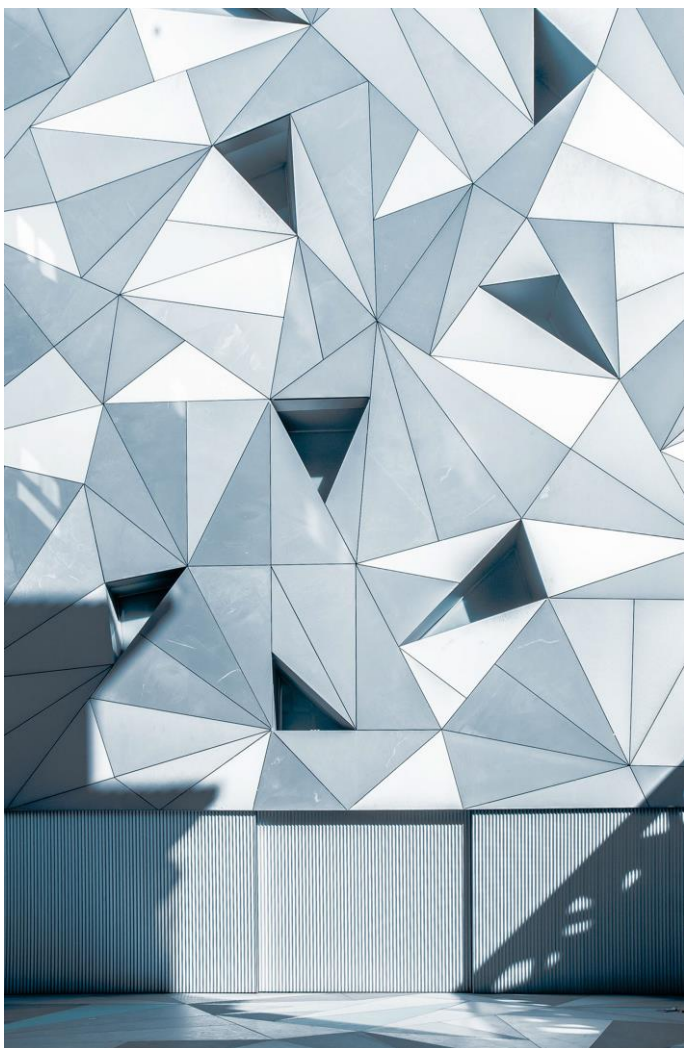


Fig. 26 Fachada do Museu ABC, Aranguren & Gallegos Architects, 2010, Madrid (Filipe, 2017)

No entanto, segundo as categorias de ornamento contemporâneo de Antoine Picon, alguns edifícios do movimento moderno podem ser considerados ornamentados, pois encaixam na categoria de ornamento topológico. Com efeito, esta categoria é bastante abrangente, enquadrando uma enorme variedade de ornamentos. Tanto os tijolos da Casa Cerâmica (Fig. 28) como a forma do Centro Heydar Aliyev (Fig. 29) podem ser considerados, segundo Picon, ornamento topológico. Apesar de terem uma geometria semelhante, baseada na ondulação, estes dois tipos de ornamento têm implicações completamente distintas. Como tal, neste trabalho, o ornamento topológico foi subdividido de acordo com a sua intervenção no volume do edifício, gerando o ornamento topológico de superfície e ornamento topológico volumétrico. O primeiro manifesta-se como uma camada espalhada numa superfície, através do relevo, enquanto o segundo é a forma volumétrica do edifício.

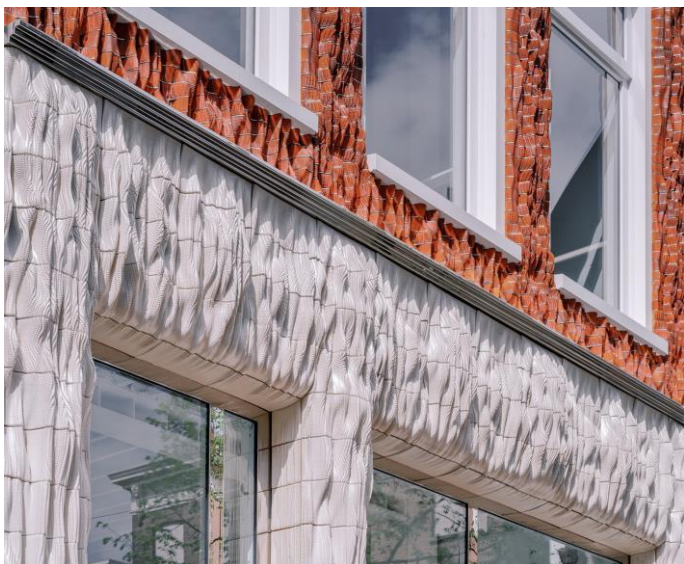


Fig. 28 Casa Cerâmica, Studio RAP, 2023, Amsterdão (De Vecchi, 2023)



Fig. 29 Centro Heydar Aliyev, Zaha Hadid Architects, 2013, Baku (Baan, 2013)

Com todas estas diferenças entre ornamento tradicional e contemporâneo levanta-se a seguinte questão: será que o termo ornamento é apropriado para descrever a decoração dos edifícios atuais? Para Picon faz sentido continuar a usar este termo na contemporaneidade, pois ornamento constitui ainda uma forma de expressão do artista que valoriza a percepção do utilizador/observador (2013, p. 48).

Pode-se dizer com certeza que o ornamento contemporâneo cumpre a função de prazer, uma vez que pretende transmitir sensações. No entanto, o mesmo não pode ser dito em relação às outras duas funções do ornamento tradicional. A relação entre o estatuto social e o ornamento contemporâneo é ambígua – este surge onde existe capital, o que significa quase sempre em grandes projetos públicos, mas também em apartamentos de luxo. A segunda idade da máquina pode e deve permitir que o ornamento seja mais acessível a todos. Por último, é possível afirmar que o conhecimento está praticamente ausente no ornamento atual. Existem exceções, como a Biblioteca da Escola Técnica de Eberswalde (Fig. 30), cuja fachada revela imagens da

vida alemã através dos olhos do artista Thomas Ruff, incentivando a transmissão de conhecimento histórico.



Fig. 30 Biblioteca da Escola Técnica de Eberswalde, Herzog & de Meuron, 1999, Eberswalde (Šmidek, 2013)

Em suma, a complexidade formal da arquitetura contemporânea tem-se manifestado através do ornamento. Efetivamente, este foi um elemento incontornável na história da arquitetura, muito associado à complexificação da mesma. A arquitetura desornamentou-se e reornamentou-se várias vezes, mas o fenómeno acentuou-se no século passado: com a chegada da revolução industrial a ornamentação tradicional foi desaparecendo gradualmente. Geraram-se movimentos que tentaram combater a máquina e valorizar o artesão, mas não foram bem-sucedidos. A eficiência da máquina levou a uma desornamentação da arquitetura no início do século XX e com uma construção cada vez mais industrializada, a mão de obra artesanal tornou-se cara e escassa. O foco dos arquitetos saiu do ornamento e foi para a volumetria e para o detalhe.

No final do século XX, surgiu a possibilidade de reornamentação como resultado da segunda idade da máquina, através das ferramentas de fabricação digital. A arquitetura tem vindo a responder a esta oportunidade, mas com um novo tipo de ornamento. Picon separa o ornamento contemporâneo do tradicional, categorizando-o em três tipos consoante a morfologia: a textura, o padrão e a topologia. No entanto, considerou-se necessário subdividir este último em dois: o ornamento topológico de superfície e ornamento topológico volumétrico.

1.3. ARTESANATO DIGITAL

Com o aprimoramento das ferramentas digitais e industriais foi possível alcançar novamente a não padronização. Este é um passo fundamental para o arquiteto se transformar num artesão, que sempre se destacou pela individualidade das peças por si produzidas. Mas na verdade o que significa ser artesão?

1.3.1. ARQUITETO-ARTESÃO

Segundo Richard Sennet, o artesão é um indivíduo que se dedica a um bom trabalho por si só, procurando a excelência do objeto que produz. O artesanato vai para além da habilidade manual, tratando-se da ligação estreita entre arte e ofício, cabeça e mão, técnica e ciência. Este baseia-se em competências de alto nível adquiridas através da prática, exigindo as “famosas” dez mil horas de experiência para atingir a mestria. Neste nível, a técnica torna-se mais centrada nos problemas e menos mecânica, permitindo uma compreensão e expressão profundas (2009, p. 20).

Sennet considera a competência do artesão não tanto um talento inato, mas antes uma prática treinada que envolve repetição e aperfeiçoamento. A seu ver, a ideia de que a inspiração súbita ou o talento bruto substituem o treino é enganadora. Mesmo os prodígios musicais como Mozart basearam-se no treino e na prática repetitiva para desenvolver as suas capacidades. O compositor austríaco utilizava métodos para fazer com que a sua música parecesse espontânea, mas as suas cartas revelam que ele revia e ensaiava meticulosamente as suas composições mentalmente antes de as escrever (2009, p. 37). Sennet sugere que as alegações de talento inexplorado sem treino são geralmente fantasias, ao passo que a aprendizagem repetitiva, apesar de ser vista como aborrecida, incentiva a autocritica e o crescimento. As ferramentas digitais permitem pela primeira vez na história da arquitetura a transformação do arquiteto em artesão. A acessibilidade destas ferramentas permite ao arquiteto controlar simultaneamente o desenho e a fabricação.

O artesanato e a ornamentação têm uma relação muito forte, pois esta é um dos principais modos de expressão do artesão. O ornamento contemporâneo, tal como o

tradicional, requer habilidade e criatividade para projetar e produzir com eficácia. Embora as técnicas avançadas de fabricação possam agilizar o processo de produção, este ainda tem de ser criado e pensado pelo artesão. As novas ferramentas, ao facilitarem a produção, permitem uma maior exploração do ornamento.

Com as suas qualidades potentes como intérprete de uma realidade calculada, o computador oferece um ambiente híbrido para pensar e desenvolver ornamentação em maneiras fundamentalmente diferentes. (Malé-Aleman & Sousa, 2005, p. 451)

O arquiteto artesão tem disponível o enorme potencial da máquina contemporânea para se expressar. Esta não só resolve o problema da fabricação, como também oferece novos métodos de projetar, o que leva à seguinte questão: até que ponto é que a máquina deve estar envolvida no processo criativo?

1.3.2. ARTESÃO COM MÁQUINA

Desde a Revolução Industrial que as máquinas têm sido vistas como uma ameaça para o artesão devido à sua natureza incansável e precisa. Porém, atualmente, a ameaça é mais subtil, mas igualmente significativa. Richard Sennet considera que a máquina contemporânea irá diminuir as oportunidades para o artesão desenvolver e exercitar as suas habilidades (2009, p. 39). Com o aumento da automação e do uso da tecnologia no local de trabalho, as tarefas que exigem destreza manual e soluções criativas são frequentemente deixadas para as máquinas. Como resultado, as oportunidades para o Homem desenvolver as suas habilidades e melhorar o seu ofício, através da prática e da repetição, estão a diminuir.

Por esta razão, Sennet tem uma posição algo conservadora em relação ao papel das novas tecnologias na valorização do artesanato. O autor adverte que a má utilização de ferramentas como o CAD suscita preocupações quanto ao impacto no trabalho artesanal e no pensamento do projeto. Ainda assim, reconhece o seu potencial e incentiva a sua utilização.

Desenho assistido por computador poderá servir como um emblema de um grande desafio enfrentado pela sociedade moderna: como pensar como artesãos fazendo bom uso da tecnologia. (2009, p. 44)

O arquiteto Renzo Piano argumenta que o CAD não substitui a compreensão profunda e o envolvimento conseguidos através do desenho manual tradicional. Para o arquiteto italiano, “projetar não é uma experiência linear” (1997, p. 18), pois envolve desenhar, refinar, fazer e redesenhar. Segundo Sennet, este processo alimenta a criatividade e o artesanato. Pelo contrário, a utilização incorreta do CAD ocorre quando o arquiteto depende apenas do computador para gerar projetos. Este processo estático e fechado elimina a circularidade iterativa essencial para o artesanato.

Sennet acrescenta ainda que os ecrãs de computador têm dificuldade em transmitir com precisão as texturas e cores dos materiais. O desenho físico, com as suas qualidades tácteis, relacionais e incompletas, permite uma gama mais vasta de experiências, fomentando a criatividade e a exploração. O autor não sugere substituir o CAD pelo desenho à mão, mas sim reconhecer o valor da sua combinação.

O modo correto de usar a máquina é julgar as suas capacidades, descobrir os seus usos, à luz dos nossos próprios limites, e não do potencial da máquina. (2009, p. 105)

Na verdade, o desenvolvimento da tecnologia e da automação também criou oportunidades para o artesão. A máquina, inicialmente vista como uma ferramenta simples com um uso limitado, por apenas produzir elementos padronizados, possibilita novamente o trabalho único e não padronizado característico de um artesão. Sennet enfatiza a importância de tirar o máximo partido das tecnologias disponíveis, utilizando como exemplo o arquiteto Frank Gehry. No seu projeto para o Museu Guggenheim Bilbao (Fig. 31), o arquiteto americano desenvolveu um novo método de fabricação para os painéis metálicos da fachada, subvertendo um método já existente noutra indústria. Ao desenhar a fachada, Gehry apercebeu-se que não existia uma tecnologia que fosse capaz de produzir os painéis de titânio que tinha imaginado. No entanto, desenvolveu uma nova máquina capaz de produzir os mesmos, com base num sistema

de suspensão hidráulica de automóveis (2009, pp. 223–224).

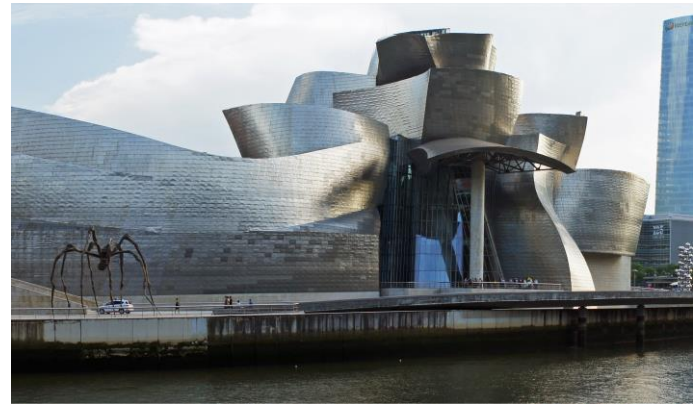


Fig. 31 Museu Guggenheim de Bilbao, Gehry Partners, 1997, Bilbao (Ortiz, 2012)

1.3.3. ARTESÃO DIGITAL

Segundo Lars Spuybroek, os exemplos que Sennett oferece de arquiteto-artesão, Piano e Gehry, exemplificam uma utilização inadequada do computador. Piano acrescenta aos seus projetos um único gesto à mão, com uma torção da fachada ou da cobertura, que não se relaciona com a rigidez do interior. Por outro lado, Gehry projeta os seus edifícios construindo maquetes com base na forma de papel esmagado. Spuybroek observa que os modos de projetar destes arquitetos não valorizam o artesanato, pois reduzem a criatividade do arquiteto a um único momento artístico.

Se, em vez disso, tivéssemos um artesanato multifacetado a trabalhar no cerne do projeto hoje – e o digital é o primeiro meio unificado do nosso tempo a permitir isso – significaria um deslocamento fundamental não apenas do trabalho, mas da relação do projetista com a matéria. (2016, p. 63)

Apesar da crítica ao seu processo, Frank Gehry explorou ao máximo as tecnologias disponíveis para a execução dos seus projetos. O arquiteto americano está entre os pioneiros e criadores de tendências que utilizaram ferramentas avançadas de desenho e fabricação digital, como o programa CATIA e a fabricação CNC (controle numérico computadorizado). Todavia, para Spuybroek, o artesanato deve passar de métodos tradicionais para processos digitais, incluindo a conceção e a fabricação. Esta transformação abrange tudo, desde o desenho até às máquinas que cortam e fresam materiais. Para o arquiteto holandês, à medida que o artesanato se funde com o computador, irá ocorrer uma convergência inesperada de valores artísticos e avanços tecnológicos

(2016, p. 69). Picon argumenta que este processo, muitas vezes sustentado pelos princípios que Ruskin enumera em *As Sete Lâmpadas da Arquitetura*, acaba por se esquecer de um dos principais pontos deste autor – a valorização da mão de obra.

No discurso atual de fabricação não uniformizada, nada existe para além da mão do projetista que mexe um rato em frente a um ecrã enquanto máquinas fresam materiais de acordo com as suas especificações. (Picon, 2013, pp. 143–144)

Picon escreve que este “ruskinismo digital” coloca o projetista como o novo artesão na era do desenho assistido por computador, porém desconsidera totalmente a retoma do artesão tradicional. Isto é algo que tem sido desvalorizado pelos arquitetos que incentivam o uso da fabricação digital na arquitetura contemporânea. Todavia, é necessário ter em conta que livros como *As Sete Lâmpadas da Arquitetura* foram escritos durante o século XIX, ou seja, num contexto completamente distinto. Atualmente, exigir a retoma da mão de obra na construção é insensato, uma vez que um dos principais problemas desta indústria é sua crescente escassez (Lusa, 2024). Para mais, Ruskin não conhecia a máquina não padronizada, que certamente traria novas questões aos seus manifestos. A máquina contemporânea e o “ruskinismo digital” respondem à principal exigência do autor: as peças todas iguais podem ser peças todas diferentes, permitindo a criatividade e a diversidade.

De facto, o movimento *Arts and Crafts*, por ter mais de um século, não sustenta diretamente o uso da fabricação digital na arquitetura contemporânea. Por mais que se tente reinterpretar o significado de artesanato na contemporaneidade, este termo está intimamente ligado ao trabalho manual, o que é bastante conflituoso com a mensagem do “ruskinismo digital”. Talvez seja necessário um novo movimento que valorize o ornamento e a não padronização, mas que se baseie na máquina e não no artesão tradicional. Porque não artes e tecnologias em vez de artes e ofícios? Ou *Arts and Techs* em vez de *Arts and Crafts*?

Neri Oxman utiliza o termo “artesanato digital” (*digital craft* em inglês) para definir esta nova era, separando-o do artesanato tradicional (Oxman, 2007). Tal como o ornamento, o artesão tradicional foi ultrapassado, sendo substituído pelo artesão digital. Tanto Sennet como

Spuybroek afirmam que este deve explorar ao máximo o potencial da tecnologia disponível. Por um lado, Sennet valoriza a relação entre a mão e a cabeça, sublinhando a importância dos processos analógicos. Por outro lado, Spuybroek considera este método demasiado conservador, defendendo que o verdadeiro potencial do computador está no próprio computador.

Efetivamente, nos exemplos oferecidos por Sennet, o computador é apenas uma ferramenta auxiliar que traz rigor e torna possível a materialização do projeto. Vários arquitetos contemporâneos exploram ainda mais o potencial do computador, utilizando o mesmo como ferramenta criativa. Tal acontece na Adega Gantenbein (Fig. 32), cujo desenho da fachada é um *render* de uma simulação digital de uma caixa de uvas (Fig. 33). Tal simulação poderia ter sido feita analogicamente, mas o meio digital oferece mais controlo sobre variáveis, como a luz ou a dimensão das “uvas”.



Fig. 32 Adega Gantenbein, Gramazio & Kohler e Bearth & Deplazes Architekten, 2006, Suíça (Feiner, 2012)

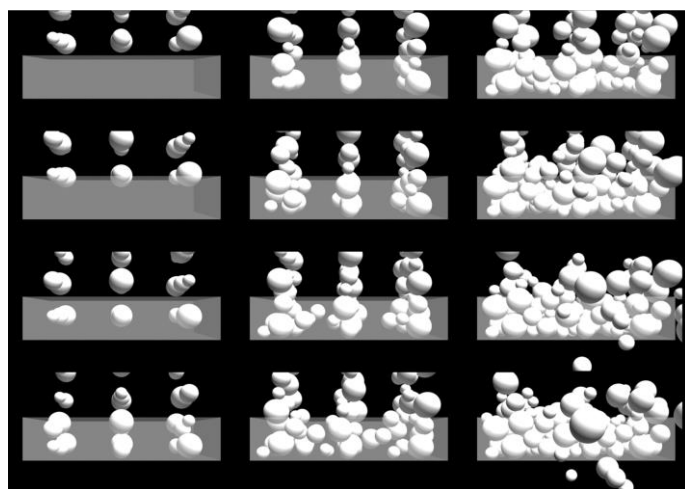


Fig. 33 Simulação digital da queda de uvas dentro de uma caixa (Bearth & Deplazes Architekten & Gramazio & Kohler, 2012)

Outros arquitetos têm uma abordagem mista, incluindo processos analógicos e digitais na concepção. O Estádio Nacional de Pequim (Fig. 34) dos Herzog & de Meuron foi desenhado, numa fase inicial, através da construção de maquetes de estudo (Fig. 35). Contudo, numa segunda fase, a estrutura foi desenvolvida com o auxílio do computador, acrescentando o padrão à fachada que lhe dá o nome de “ninho de pássaro”.



Fig. 34 Estádio Nacional de Pequim, Herzog & de Meuron, 2008, Pequim (Gurak, 2010)

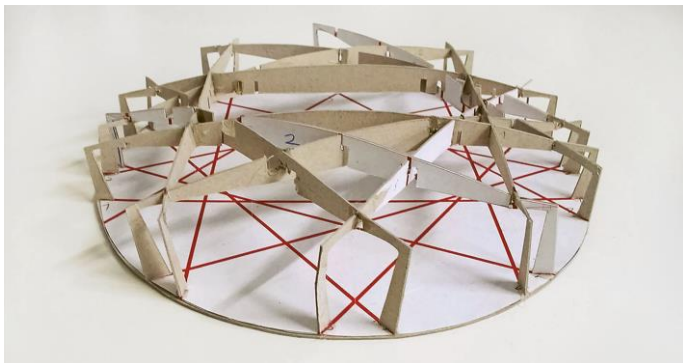


Fig. 35 Maquete de estudo para o Estádio Nacional de Pequim (Herzog & de Meuron, sem data)

As ferramentas digitais permitem ao arquiteto transformar-se num artesão e explorar novas formas de expressão. Contudo, a crescente digitalização não só na produção como no processo criativo levantou questões sobre o papel do artesão. Sennet e Spuybroek concordam que a fabricação deve passar para a máquina, no entanto discordam no processo de concepção. Para Sennet uma das principais características do artesão é a sua pesquisa por novos métodos de fabricação – este deve utilizar as ferramentas mais tecnologicamente avançadas. No entanto, considera os métodos analógicos, como o desenho tradicional do arquiteto Renzo Piano, fundamentais para desenvolver um bom projeto. Por outro lado, Spuybroek defende uma utilização mais holística do computador, de modo a relacionar melhor o desenho e a fabricação. Uma vez que o artesão deve explorar ao máximo as tecnologias disponíveis, também o artesão contemporâneo deve explorar ao máximo as ferramentas digitais. Para o artesão contemporâneo evoluir para um artesão digital, não é necessário excluir

completamente o uso de métodos analógicos, mas é essencial incorporar o computador no processo de concepção.

1.4. DIGITALIZAÇÃO COMO HIPÓTESE

Na contemporaneidade, muitos arquitetos estão a valorizar uma abordagem mais formal à arquitetura, optando pela não padronização e utilizando ferramentas como a parametrização. Esta tendência levou à reornamentação da arquitetura, contudo o ornamento contemporâneo não tem as restrições do ornamento tradicional. Com uma maior liberdade de expressão, que caminho deve o ornamento seguir para gerar formas apelativas? Talvez a resposta a esta pergunta esteja na mimese, pois, tal como muitos arquitetos ao longo da história já haviam descoberto, as formas naturais oferecem um modo seguro de gerar complexidade.

1.4.1. NATUREZA E ARQUITETURA

Vários estudos revelam que o contacto com elementos naturais ou representações dos mesmos contribui positivamente para a saúde e para o conforto (Yin et al., 2018). Se o arquiteto pretende melhorar a qualidade de vida do utilizador/observador, a relação com a natureza nos seus projetos é algo incontornável.

De facto, a natureza sempre desempenhou um papel importante na arquitetura, não só influenciando o ornamento, mas também definindo as proporções e a estrutura. A proporção de ouro, por exemplo, nasce de uma tentativa de geometrizar a natureza. Em vários momentos da história da arquitetura, os arquitetos utilizaram este rácio como base dos seus projetos, sendo reconhecível em edifícios como o Partenon ou, mais recentemente, no *modulor* de Le Corbusier (Agkathidis, 2017, p. 10). Por parecer omnipresente na natureza, a proporção de ouro foi valorizada no Renascimento, com obras como o *Homem Vitruviano* de Leonardo da Vinci. Na verdade, a proporção de ouro não é assim tão comum, mas serve como uma excelente interpretação da complexidade das formas naturais. Por exemplo, a concha de um nautilus, que é uma espiral logarítmica, ou seja, uma espiral que cresce de um modo constante, pode ser representada mais facilmente por uma espiral de ouro, que cresce a cada 90 graus (Fig. 36).

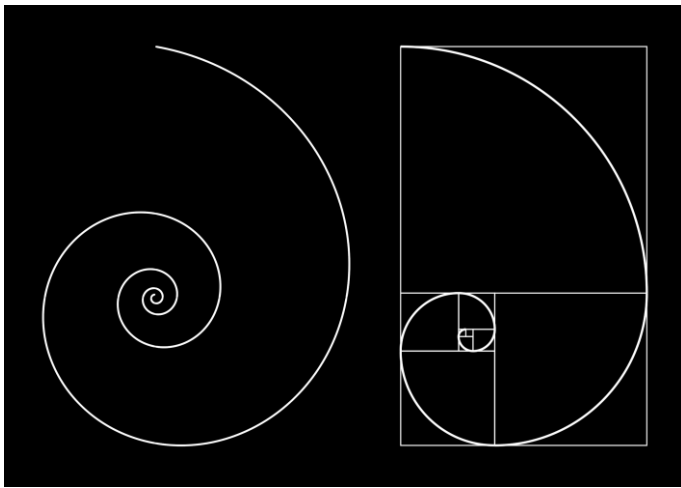


Fig. 36 Espirais geométricas: à esquerda, uma espiral logarítmica; à direita, uma espiral de ouro

Todavia, a utilização de um número abstrato, supostamente onnipresente na natureza, dificulta a relação entre arquitetura e utilizador/observador. Ao contrário do quadrado ou do círculo, as formas de ouro não são imediatamente reconhecíveis dentro de um grupo de formas semelhantes. Se a arquitetura pretende usar a natureza como inspiração, porque não considerar uma abordagem mais literal e conectada aos nossos sentidos?

Na verdade, a mimese é um fenómeno recorrente na arquitetura, expressando-se através do ornamento. Porém, “a invenção ornamental revela uma das mais fundamentais ambiguidades das fundações teóricas da disciplina arquitetónica, uma ambiguidade baseada na caracterização do arquiteto ideal como um génio inventivo que segue os princípios da natureza” (Sennett, 2009, p. 46). Esta ambiguidade não tem de ser necessariamente conflituosa. Seguir os princípios da natureza, por exemplo, replicando folhas de acanto num capitel, pode ser um processo criativo – pegar num elemento natural e transformá-lo num elemento arquitetónico envolve grandes alterações e interpretação do objeto inicial. Movimentos arquitetónicos muito baseados na mimese, como o *Art Nouveau*, são considerados também dos mais inventivos. A historiadora Anne Anderson, ao descrever este movimento, diz o seguinte:

Enquanto todos os arquitetos se voltaram para a natureza em busca de uma metáfora para a modernidade, cada um desenvolveu o seu próprio idioma. Com a individualidade como força motriz, Mackintosh, Horta, Guimard, Lechner e Gaudí destacam-se por terem desenvolvido um estilo próprio e distinto que deixou a sua marca na sua cidade natal. (2020, p. 62)

“Um enorme lençol estende-se sobre toda a superfície da terra, um véu de parede horizontal composto de pedra e folhagem, incrustado e tecido, ornamentado e vivo, mas também preservado e imóvel.” (2016, p. 97)

Ruskin considera o ornamento como a fusão de elementos aparentemente contraditórios, como o petrificado e o fibroso, o mineral e o vegetal, e a quietude e a vivacidade. Este descreve a superfície da Terra como um “véu de estranho ser intermédio”, uma camada onde coexistem vida e matéria inanimada, respirando e movendo-se, mas sem consciência (1900, p. 23). Este conceito cria uma ligação entre arquitetura e natureza, realçando a relação duradoura entre os dois. O ornamento faz parte do véu de estranho ser intermédio e este aceita e incentiva a cristalização da natureza. Spuybroek descreve esta conceção do seguinte modo:

Como referido anteriormente, Picon divide o ornamento contemporâneo em três de acordo com a sua morfologia: textura, padrão e topologia. Todavia, existe um outro tipo de ornamento cada vez mais presente na arquitetura – o ornamento orgânico. Este é constituído por elementos vegetais e está maioritariamente presente no exterior dos edifícios. Apesar da introdução destes elementos poder ser funcional, servindo para o controlo térmico e acústico, muitas vezes é maioritariamente ornamental. O ornamento orgânico está presente na empena cega coberta por plantas em frente ao CaixaForum Madrid (Fig. 37), formando uma “parede viva”; no Parque MFO (Fig. 38) em Zurique, onde uma simples estrutura de andaimes guia várias trepadeiras e forma uma cobertura para o espaço público; ou no Bosco Verticale (Fig. 39) em Milão, cujas varandas têm árvores e arbustos, resultando numa aparente floresta vertical.

A introdução do ornamento orgânico na arquitetura é fundamental e não deve ser substituída pelos outros ti-

pos de ornamento, especialmente quando serve um propósito funcional. O ornamento inorgânico deve ser visto como um complemento e não como um substituto ao ornamento orgânico. Ambos têm os seus pontos positivos e negativos: o orgânico oferece uma relação mais próxima com a natureza, mas tem custos e manutenção elevada; o inorgânico não estabelece uma relação tão forte com a natureza, mas exige pouca manutenção e não tem custos tão elevados.

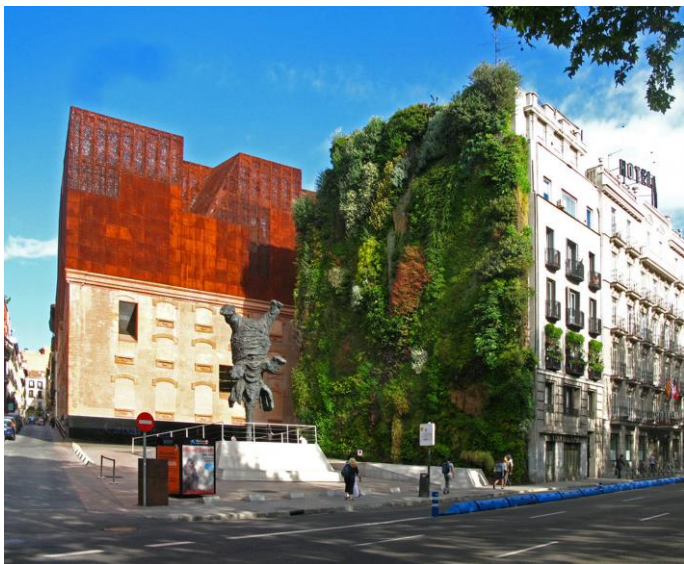


Fig. 37 CaixaForum Madrid, Herzog & de Meuron, 2008, Madrid (Blanc, 2022)



Fig. 38 Parque MFO, Burckhardt & Partners, 2002, Zurique (Bremen, 2013)



Fig. 39 Bosco Verticale, Boeri Studio, 2014, Milão (Bianchini, 2023)

1.4.2. BIOMORFISMO

Existem vários movimentos na arquitetura cujos princípios estão associados à natureza, como o biomorfismo, o organicismo e a biomimética. O biomorfismo é um movimento que, como o nome indica, tenta replicar as formas da natureza. Apesar de *bio* significar vida, este termo é alargado no contexto da arquitetura. Organicismo e biomorfismo estão relacionados e são frequentemente utilizados (incorretamente) como sinónimos, porém existem diferenças significativas entre eles. A palavra "orgânico" refere-se normalmente a algo que tem características de plantas ou animais, mas para Frank Lloyd Wright o termo "arquitetura orgânica" tinha um significado distinto – esta era uma arquitetura que se fundia com a natureza e valorizava tudo o que fosse natural, desde a paisagem até à textura dos materiais. A sua obra maior, a Fallingwater, revela uma casa que se confunde e só faz sentido com a natureza que a rodeia, complementando-a.

Nenhuma casa deve estar numa colina ou em cima de qualquer coisa. Deve ser da colina. Pertencente a ela. A colina e a casa devem viver juntas, cada uma mais feliz pela outra. (Wright, 2005, p. 168)

Também a arquitetura biomimética é diferente da biomórfica, que se baseia em soluções presentes na biologia para resolver problemas da arquitetura. Um exemplo disto é Eastgate Center (Fig. 40) no Zimbabuê, desenhado pelo arquiteto Mick Pearce, que foi desafiado a não incluir ar condicionado. O edifício utiliza a mesma técnica de ventilação que os ninhos de térmitas encontrados neste país – à noite o ar frio é bombeado para a parte inferior do edifício, enquanto o calor do dia anterior acumulado nos materiais com elevada massa térmica sobe e o edifício arrefece. Portanto, ao contrário do biomorfismo, que tem o seu foco na estética, a biomimética preocupa-se particularmente com a função.



Fig. 40 Eastgate Center, Mick Pearce, 1996, Harare (Brazier, 2008)

Apesar de conceitos como biomorfismo, organicismo e biomimética terem sido inventados no século XX, a relação entre arquitetura e natureza sempre existiu. Isto é reconhecível no ornamento tradicional, que recorrentemente se inspirou nas formas naturais. Existem inúmeros exemplos de mimese, como a cornija ornamentada do Templo de Vespasiano e Tito em Roma (Fig. 41) até à folhagem nos capitéis do Palácio Ducal em Veneza (Fig. 42).



Fig. 41 Cornija do Templo de Vespasiano e Tito, 79 a.c., Roma (Lalupa, 2005)



Fig. 42 Desenho de um capitel do Palácio Ducal, 1424, Veneza (Ruskin, 1852)

No século XX, o movimento *Art Nouveau* tentou incorporar na arquitetura vários elementos inspirados na natureza. Um dos exemplos mais notáveis deste movimento foi o arquiteto catalão Antoni Gaudí. Este tinha uma profunda admiração pelo mundo natural, o que acabou por influenciar profundamente as suas obras. Em nenhum outro lugar esta ligação é mais claramente visível do que na sua obra-prima, a Sagrada Família em Barcelona. A natureza exprime-se em praticamente todo o edifício, desde as colunas em forma de árvore (Fig. 43) até à folhagem esculpida nos frisos (Fig. 44).



Fig. 43 Interior da Sagrada Família, Antoni Gaudí, 1882-presente, Barcelona (Wang, 2012)



Fig. 45 Estação Stadelhofen, Santiago Calatrava, 1990, Zurique (Goetzke, 2000)



Fig. 44 Pórtico da Caridade na Sagrada Família (Cabana, 2012)

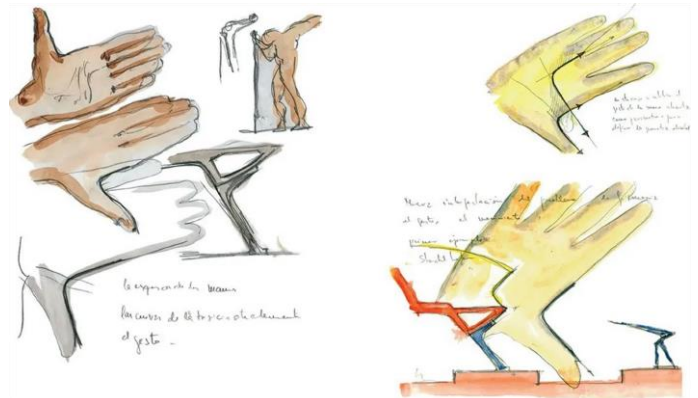


Fig. 46 Desenhos de Calatrava para a estação (Albornoz & Calatrava, 2018, pp. 46–47)

A mimese também está muito presente na arquitetura contemporânea. Santiago Calatrava é um dos principais praticantes atuais do biomorfismo. Este explora o seu interesse pela fisionomia dos animais, especialmente a sua ossatura. Num dos seus primeiros projetos, a Estação de Stadelhofen (Fig. 45), os seus esboços mostram como a forma da mão e do corpo humano influenciaram a estrutura (Fig. 46). A mimese também é reconhecível nas obras de Frank Gehry. O seu fascínio por criaturas marinhas pode ser visto tanto na sua escultura *Peix* (Fig. 47) em Espanha, como na sua escultura para o restaurante Fish Dance no Japão (Fig. 48).



Fig. 47 *Peix*, Frank Gehry, 1992, Barcelona (D'Arby, 2010)



Fig. 48 Escultura em frente ao restaurante Fish Dance, Frank Gehry, 1987, Kobe (Pellgen, 2007)

Mantendo-se a vontade de praticar a mimese, o computador começou a ser utilizado para gerar formas que replicam a natureza. As árvores, que são um tema recorrente na arquitetura biomórfica, aparecem também na atualidade. O edifício WestendGate tem à sua frente a Tree-Structure Canopy (Fig. 49), uma cobertura suportada por troncos que se vão subdividindo de um modo natural. Também Shigeru Ban traz várias vezes as árvores para os seus projetos, formando florestas interiores. O arquiteto japonês utiliza materiais provenientes das árvores, como a madeira ou o cartão, para imitá-las, como no Nine Bridges Country Club (Fig. 50).



Fig. 49 Tree-Structure Canopy em frente ao WestendGate, Just Burgeff architekten e a3lab, 2010, Frankfurt (Sönneken, sem data)



Fig. 50 Nine Bridges Country Club, Shigeru Ban Architects, 2009, Coreia do Sul (Hirai, 2010)

1.4.3. DIGITALIZAÇÃO TRIDIMENSIONAL

Como se pode verificar, existe vontade na arquitetura de replicar a natureza. Na contemporaneidade, a mimese é muitas vezes feita através da reconstrução digital de formas naturais com o auxílio da parametrização. Este processo está sujeito a elevado grau de abstração e simplificação por parte do computador. Por esta razão pergunta-se: haverá um modo mais mimético de trazer a natureza para a arquitetura?

Na atualidade existe um processo capaz de trazer para o mundo digital a forma de um objeto real com um elevado nível de detalhe – este processo chama-se digitalização tridimensional. Tal como a digitalização bidimensional, este é uma tecnologia que transforma a informação do mundo físico em informação digital, mas em três dimensões. A digitalização tridimensional utiliza ferramentas que capturam a realidade e a transformam num conjunto de pontos, cujo nome técnico é “nuvem de pontos”.



Fig. 51 Esquema do processo de transformação de um objeto real numa malha digital

Esta tecnologia é utilizada no processo criativo em arquitetura, mas apenas como ferramenta auxiliar. Um exemplo disto é Frank Gehry, que já utilizava a digitalização tridimensional no processo criativo na década de 90. O arquiteto americano imaginava os seus edifícios através de maquetes de papel, o que lhe permitia uma grande liberdade criativa e formal, gerando formas complexas e difíceis de materializar. A digitalização tridimensional das suas maquetes sinuosas, feita através de um braço de medição (Fig. 52), permitia a modelação dos respetivos edifícios. Rick Smith, engenheiro responsável pela digitalização das maquetes de Gehry, descreve o processo da seguinte forma:

Frank elaborava os seus projetos de papel e depois fazia uma maquete rigorosa. Eu seguia, digitalizando as suas maquetes para construir um modelo de computador. De seguida, ele examinava o modelo de computador e o modelo físico que havia construído para verificar as diferenças e ver se realmente tínhamos capturado as suas formas. (Lynn, 2013)

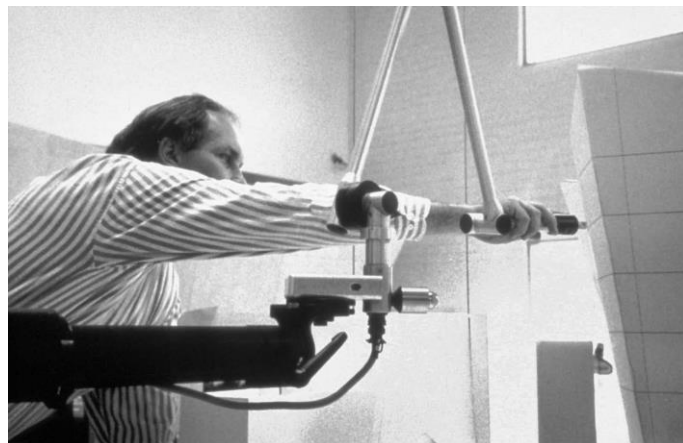


Fig. 52 Rick Smith a digitalizar a maquete do Walt Disney Concert Hall com um FaroArm (CCA, 1991)

Mais recentemente, a digitalização tridimensional tem servido como base para projetar, pois consegue capturar com detalhe a complexidade da pré-existência. Na Universidade de Estocolmo, vários investigadores têm estudado e aplicado esta ferramenta. A digitalização tridimensional oferece a possibilidade de compreender o espaço de um modo diferente, pois o modelo digitalizado consegue expressar a complexidade da realidade (Fig. 53). Em vez de imaginar um espaço como um vazio dentro seis planos lisos, esta ferramenta mostra as superfícies intrincadas que o definem (Karlsson et al., 2021).



Fig. 53 Corte de um modelo resultante de uma digitalização tridimensional (Karlsso et al., 2021, p. 465)

A digitalização tridimensional quase não é usada na arquitetura como ferramenta principal de concepção. Todavia, noutras áreas, como na escultura, o potencial desta ferramenta tem sido explorado neste sentido. A artista Yuko Oda investiga a coexistência da natureza sintética e orgânica através da digitalização e fabricação digitais. Na sua obra *evolution*, gotas de orvalho feitas de resina translúcida levantam-se da superfície de folhas reais, transformando-se em folhas artificiais cada vez mais realistas (Fig. 54). Yuko Oda usou um *laser scanner* e uma plataforma giratória para digitalizar uma folha seca, que depois foi impressa em resina (Shining 3D, 2022) (Fig. 55). No fundo, este processo poderia ser aplicado ao ornamento em arquitetura.



Fig. 54 *evolution*, Yuko Oda, 2021 (Featheringhill, 2021)



Fig. 55 Processo de digitalização a laser e modelo impresso em resina de uma folha seca para a escultura *evolution*, Yuko Oda, 2021 (Shining 3D, 2022)

Em síntese, o ornamento contemporâneo, tal como o tradicional, inspira-se frequentemente na natureza. Esta sempre influenciou a arquitetura indiretamente, através das proporções, e diretamente, pelo ornamento. A natureza é um tema recorrente na história da arquitetura; uma fonte de conforto e bem-estar para o utilizador/observador; e oferece um modo seguro de complexificar o edifício. A ideia de replicar as formas naturais na arquitetura continua nos dias de hoje com movimentos como o biomorfismo. Todavia, a arquitetura contemporânea utiliza o computador para gerar elementos naturais, o que acaba por remover a sua complexidade e beleza. Assim, levantou-se a hipótese de utilizar a digitalização tridimensional como um modo de transportar as formas naturais para a arquitetura de um modo mais mimético.

1.5. CONCLUSÃO

No ESTADO DA ARTE ficou evidente que existe uma tendência para complexificar em arquitetura, assim como em todas as áreas, que está associada ao desenvolvimento tecnológico. Esta tem sido particularmente influenciada pela evolução das ferramentas de fabricação digital, que foram potenciadas pela parametrização por facilitar a comunicação entre o arquiteto e o computador. Concluiu-se que a simplificação da tecnologia, através da interface, permite alcançar ainda mais complexidade. Um dos principais modos de expressão da complexidade na arquitetura é o ornamento, pois este oferece um momento escultórico e livre de outras condicionantes. “A mais complexa de todas as artes” (Scott, 1914), dependente da *firmitas* e *utilitas*, encontra no ornamento a possibilidade de se expressar.

Os princípios de desornamentação do movimento moderno baseavam-se na ideia de o ornamento ser um desperdício de mão de obra, valorizando a eficiência da máquina e da padronização. A máquina, apesar de ter sido o principal fator de desornamentação da arquitetura do século passado, é hoje o mais importante catalisador da ornamentação. As ferramentas de fabricação digital conseguem produzir objetos não padronizados de forma eficiente. Estas circunstâncias tecnológicas provocaram um fenómeno de reornamentação na arquitetura. Ainda assim, o ornamento tradicional é substancialmente diferente do ornamento contemporâneo, que o arquiteto Antoine Picon divide consoante a sua morfologia em padrão, textura e topologia (2013). O ornamento topológico é bastante abrangente, pois inclui tanto a forma volumétrica de um edifício como o relevo de uma superfície. Por esta razão, neste trabalho sugere-se a subdivisão da última categoria em topologia de superfície e topologia volumétrica.

Com o desenvolvimento das ferramentas digitais, o arquiteto tem a possibilidade de se transformar num artesão, pois pode controlar tanto o desenho como a fabricação do ornamento no edifício. O artesão contemporâneo, chamado de artesão digital, deve tirar o máximo partido das tecnologias digitais. Portanto, faz sentido que explore uma tecnologia subaproveitada como a digitalização tridimensional. Esta oferece a possibilidade de trazer formas naturais para a arquitetura, o que é um objetivo de vários arquitetos contemporâneos. A natureza oferece conforto e é recorrentemente reproduzida na história da arquitetura, logo a mimese é um modo seguro de ornamentar. Por permitir a reprodução da forma de elementos naturais com um elevado nível de detalhe, foi proposta a digitalização tridimensional. Outras áreas artísticas já tiram partido desta tecnologia para este fim, portanto a arquitetura também o pode fazer.

2. FOTOGRAMETRIA

Dentro da digitalização tridimensional, foi destacada a fotogrametria pela sua acessibilidade. Esta tecnologia beneficiou com a utilização generalizada de telemóveis com câmeras fotográficas de alta-definição. A fotogrametria consiste em digitalizar um objeto real, transformando fotografias em informação tridimensional digital. A arquitetura tem aproveitado esta tecnologia, mas não como ferramenta criativa. No âmbito deste trabalho, foi realizado um workshop que demonstrou a facilidade de utilização da fotogrametria.

O fator determinante na qualidade dos resultados do processo fotogramétrico é a fotografia. Assim, foram apresentados conceitos fotográficos, como a exposição e a iluminação, que são fundamentais para gerar nuvens de pontos com resolução elevada. Abordou-se ainda a limpeza do modelo 3D resultante da fotogrametria.

2.1. DIGITALIZAÇÃO COM FOTOGRAFIA

Dentro da digitalização tridimensional, existem várias ferramentas e técnicas que produzem resultados diferentes. Desta lista, surge realçada a fotogrametria pela sua acessibilidade, uma vez que até com a câmara de um telefone atual é possível executá-la. No entanto, o que é exatamente a fotogrametria?

2.1.1. UMA TECNOLOGIA EMERGENTE

Tal como as outras ferramentas de digitalização tridimensional, o principal objetivo da fotogrametria é reconstruir digitalmente um objeto real. No processo fotogramétrico, as fotografias servem como uma base de dados bidimensional que é transformada em informação tridimensional (Luhmann, 2013, p. 2).

Um processo fundamental da fotogrametria é a triangulação, sendo este o método utilizado para a reconstrução digital do objeto capturado (Fig. 56). Para tal, são usadas fotografias parcialmente sobrepostas tiradas de pontos de vista diferentes. Com base nas posições co-

nhecidas das câmeras, é possível calcular as coordenadas tridimensionais do objeto capturado, identificando e combinando pontos correspondentes em diferentes imagens. A partir da interseção de pelo menos dois raios que partem de câmeras diferentes em direção a um ponto, o mesmo pode ser localizado em três dimensões. Numa fase inicial da tecnologia o cálculo geométrico da triangulação era feito manualmente e era necessário saber a posição e a orientação exatas das câmeras. Contudo, na atualidade este processo, incluindo o posicionamento das câmeras, foi automatizado através de algoritmos (Fig. 57).

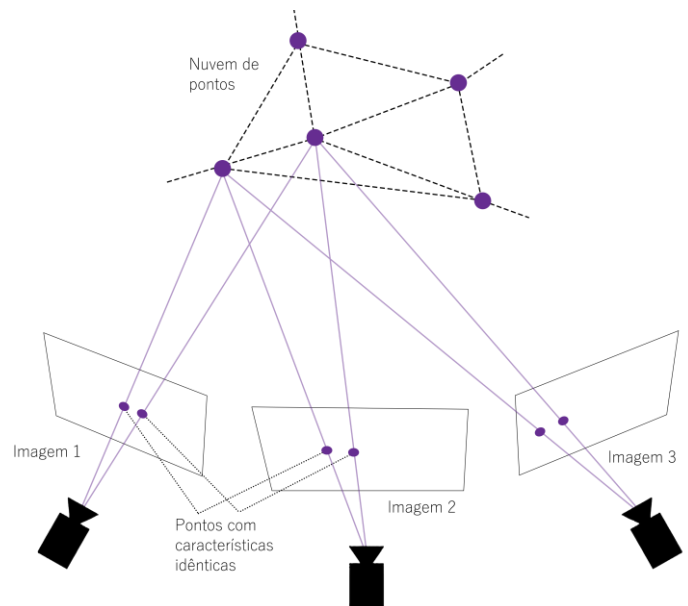


Fig. 56 Esquema da triangulação no processo fotogramétrico



Fig. 57 Esquema do processo fotogramétrico manual e digital

A origem da fotogrametria é relativamente contemporânea ao aparecimento da própria fotografia. Logo após as primeiras imagens fotográficas nas décadas de 1830 e 1840, um oficial militar francês chamado Aimé Laussedat, considerado o “pai da fotogrametria”, começou a explorar esta tecnologia, criando os seus fundamentos matemáticos. Laussedat foi a primeira pessoa a utilizar fotografias para levantamentos topográficos, já em 1861, com base numa técnica a que chamou “metrofotografia”, que já tinha implementado com vistas desenhadas à mão de edifícios e paisagens montanhosas (Polidori, 2020, p. 1).

Com base nos princípios desenvolvidos por Laussedat, a tecnologia foi mais tarde aplicada às fotografias aéreas, obtidas com balões de ar quente (Fig. 58) e papagaios de papel, que permitiram fazer mapeamentos ainda mais rigorosos e independentes das características geológicas. Também neste período na Alemanha, o arquiteto Albrecht Meydenbauer, que cunhou o termo “fotogrametria”, utilizou fotografias para produzir plantas da Catedral de Wetzlar (Luhmann, 2013, p. 17).

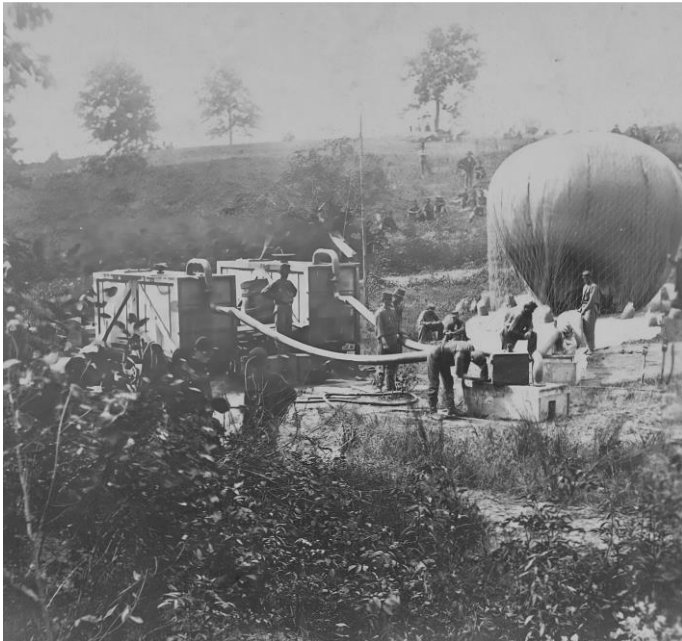


Fig. 58 Primeiras experiências de fotografias aéreas com balões de ar quente (Mathew, 1862)

Um dos maiores avanços na fotogrametria ocorreu em meados do século XX com a chegada do digital. Os computadores impulsionaram um novo processo fotogramétrico, o *bundle adjustment*, que é uma técnica dominante ainda hoje usada na fotogrametria. Este método de calibração automática retirou as restrições à posição e orientação das câmeras e permitiu que praticamente qualquer máquina fotográfica pudesse ser utilizada. Com o desenvolvimento da imagem digital e processamento da mesma, o processo fotogramétrico mudou significativamente. A possibilidade de ter um fluxo de dados rápido e fechado, levou à redução do tempo desde a obtenção das imagens até à apresentação dos resultados. Ademais, a qualidade superior das imagens digitais permitiu obter resultados com maior resolução e precisão.

A fotogrametria é categorizada por Thomas Luhmann em *Close Range Photogrammetry* da seguinte maneira:

- De satélite – processamento de imagens de teledeteção e de satélite, com alturas superiores a cerca de 200 km;
- Aérea – processamento de fotografias aéreas, com alturas superiores a cerca de 300 metros;
- Terrestre – medições a partir de uma localização terrestre fixa;
- De curto alcance – distância ao objeto inferior a cerca de 300 metros;
- Macro – escala de imagem maior que 1, como imagens de microscópio;
- Móvel – aquisição de dados de veículos em movimento, com distância normalmente inferior a 100 metros.

2.1.2. UMA TECNOLOGIA SUBAPROVEITADA

Pela escala dos objetos capturados nesta dissertação, foi explorada a fotogrametria de curto alcance. Este tipo de fotogrametria é usado em várias áreas e para vários fins, nomeadamente: em engenharia civil para medir a deformação de elementos de um edifício; na indústria automóvel para detetar defeitos de fabrico; em análise forense para documentar acidentes automóveis; ou em medicina para fabricar próteses.

Em arquitetura esta tecnologia é usada, essencialmente, para registo de edifícios e modelos 3D de cidades e paisagens. Os registos fotogramétricos de edifícios destinam-se principalmente a gerar desenhos técnicos para preservação e restauro, análise histórica e documentação. A fotogrametria oferece uma série de vantagens em comparação aos métodos manuais de levantamento de edifícios. Esta ferramenta de elevada precisão permite: a medição sem contacto, evitando andaimes na fachada; o risco reduzido de acidentes; a aquisição rápida de imagens no local; a medição de coordenadas tridimensionais; e a medição de formas complexas, como pormenores ornamentais (Luhmann, 2013, p. 579).

A digitalização das escavações em Pompeia ilustra bem a utilização da fotogrametria para criar uma documentação 3D completa de um objeto complexo e extenso. As fotografias aéreas e terrestres, bem como o varrimento laser, foram utilizados para a aquisição de dados

e, através de medições GPS, foram escalados de acordo com a realidade. A precisão da captura ficou na escala dos centímetros para as imagens aéreas e dos milímetros para as medições terrestres. A Fig. 59 mostra uma nuvem de pontos 3D resultante da fusão de várias digitalizações individuais, enquanto a Fig. 60 mostra alguns detalhes ornamentais (Guidi et al., 2009).



Fig. 59 Nuvem de pontos do Fórum de Pompeia (Guidi et al., 2009)



Fig. 60 Modelos 3D de detalhes ornamentais do Fórum de Pompeia (Guidi et al., 2009)

2.1.3. UMA TECNOLOGIA ACESSÍVEL

Para se realizar uma fotogrametria, é necessário ter acesso a fotos com alta definição e a *software* de fotogrametria, assim como ter conhecimento sobre o método de captura e a utilização desse *software*. Atualmente, a maioria das pessoas tem acesso a telemóveis que tiram fotos com alta definição. Além disso, existem vários *softwares* de fotogrametria de código aberto, como o Meshroom, que disponibilizam a sua utilização gratuitamente. Tendo já acesso às ferramentas, é necessário apenas o conhecimento prático para poder realizar uma fotogrametria.

Caso alguém sem conhecimento prévio desta tecnologia receba uma breve explicação sobre a mesma, será fácil para esta pessoa realizar uma fotogrametria? Com esta pergunta em mente foi realizado no dia 27 de junho de

2023 no Pavilhão Carlos Ramos da Faculdade de Arquitetura do Universidade do Porto um workshop intitulado Photo 3D. O workshop teve como principal objetivo introduzir a fotogrametria à comunidade académica da faculdade. Este foi dividido em três partes: a apresentação introdutória, a captura das imagens e o processamento das mesmas.

Nos primeiros 30 minutos foram apresentados o contexto histórico da fotogrametria e o funcionamento desta tecnologia, explicando alguns métodos de captura e a utilização do *software* (Fig. 61). De seguida, no jardim em torno do pavilhão, cada participante escolheu um objeto para fotografar (Fig. 62). Limitou-se a escolha dos objetos capturados a elementos naturais com uma escala reduzida como pedras, folhas, troncos, etc. Por último, em cerca de 1 hora, cada participante processou as fotografias tiradas na fase anterior, utilizando os seus computadores portáteis (Fig. 63). O *software* escolhido foi o Agisoft Metashape pela sua compatibilidade com macOS e Windows, facilidade de utilização e possibilidade de experimentar o programa gratuitamente durante 30 dias.



Fig. 61 Apresentação do workshop (Güzcelci, 2023)



Fig. 62 Digitalização no jardim do Pavilhão Carlos Ramos (Güzcelci, 2023)



Fig. 63 Processamento das fotografias nos computadores (Güzcelci, 2023)

Praticamente todos os participantes conseguiram digitalizar elementos naturais frágeis e com geometrias complexas (Fig. 64).



Fig. 64 Fotogrametrias realizadas pelos participantes do workshop

No final do workshop, os participantes preencheram um formulário que procurava obter mais informações em relação à fotogrametria, resultando em vários gráficos presentes na Fig. 65.

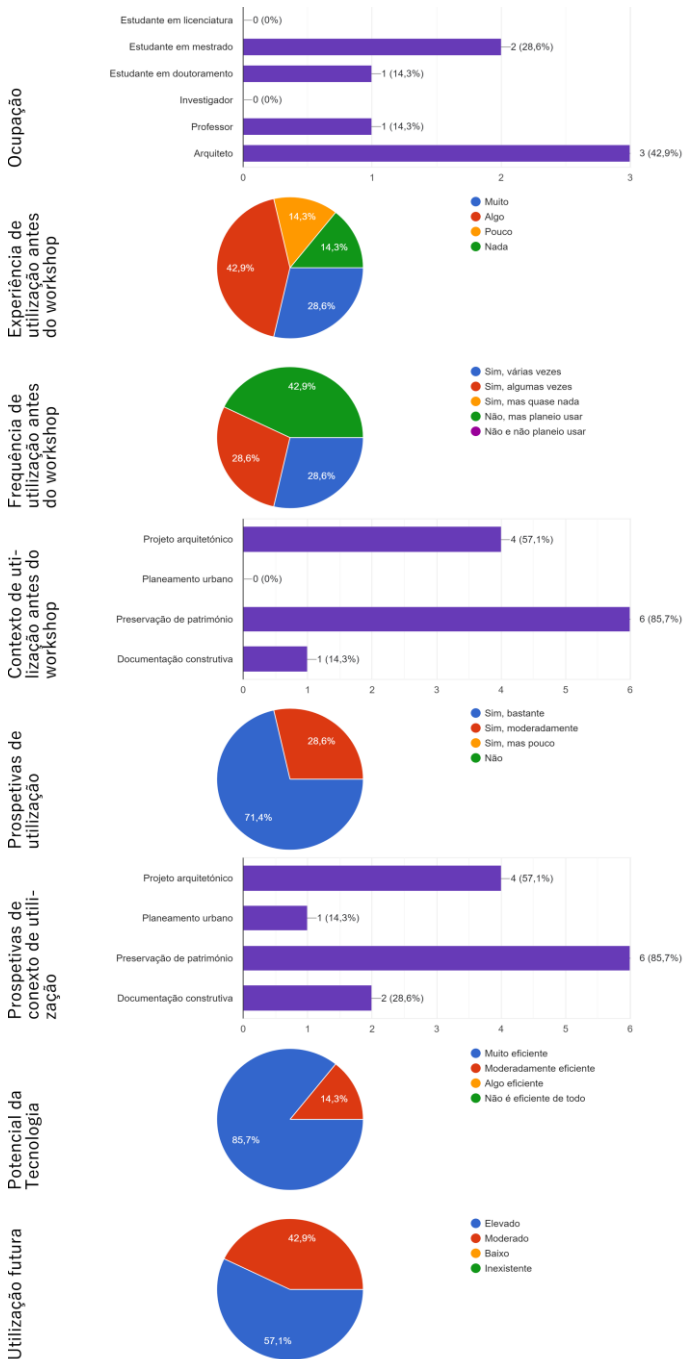


Fig. 65 Gráficos referentes ao formulário do workshop

O inquérito permitiu aferir que os participantes desta atividade eram estudantes de mestrado e doutoramento em arquitetura, assim como professores e arquitetos. Cerca de metade exercia a sua ocupação em contexto académico. É importante notar que grande parte dos participantes estavam de algum modo familiarizados com esta tecnologia antes de participar no workshop. Várias pessoas já tinham usado esta tecnologia no âmbito da arquitetura, enquanto as restantes planeavam usar.

As pessoas que já tinham usado a tecnologia usavam-na no contexto de preservação de património. Na verdade, mesmo aqueles que nunca tinham usado a fotogrametria também queriam usá-la neste contexto. Faz

sentido que assim seja, pois este é o principal uso da tecnologia em arquitetura atualmente. Quase todos os participantes consideraram a fotogrametria muito eficiente como ferramenta auxiliar em arquitetura. Cerca de metade dos participantes consideraram moderado o potencial desta tecnologia como uma ferramenta criativa, enquanto a outra metade considerou elevado.

Em suma, a fotogrametria não é uma tecnologia recente, tendo sido inventada no século XIX, mas tem vindo a ganhar importância no mundo da arquitetura. Esta é uma tecnologia subaproveitada por ser essencialmente utilizada para levantamento e documentação. Como mostra o workshop Photo 3D, a fotogrametria é uma tecnologia acessível, tanto em termos de captura como processamento. Após esta introdução à tecnologia, serão abordadas componentes mais específicas do processo fotogramétrico.

2.2. DO REAL PARA O DIGITAL

No capítulo anterior entendeu-se que a fotogrametria é uma ferramenta bastante acessível. Ainda assim, existem muitas variáveis que ditam a qualidade das nuvens de pontos resultantes. Por esta razão, este capítulo visa explorar o processo fotogramétrico, desde a captura das imagens até ao tratamento da nuvem de pontos, focando-se nos métodos utilizados neste trabalho.

2.2.1. PROCESSO FOTOGRAMÉTRICO

Como referido anteriormente, as fotografias são a base fundamental do processo fotogramétrico. Como tal, uma boa metodologia na captura de imagens traduz-se numa boa digitalização. A adoção de um método de captura torna mais eficiente o processo, evitando falta ou excesso de fotografias. Os dois métodos mais frequentemente utilizados são a captura em órbita (Fig. 66) e em percurso (Fig. 67). A primeira consiste em dividir o processo em órbitas, fotografando o objeto ao seu redor a diferentes alturas. Este método é normalmente aplicado quando o objeto que se pretende digitalizar tem limites definidos e é facilmente circundável. Outro método utilizado é o percurso, que funciona melhor na captura de superfícies. Este é um método frequentemente utilizado pelos drones na fotogrametria aérea. Através de um

percurso, por exemplo, em ziguezague é possível capturar uma superfície inteira metodicamente. Independentemente do método de captura escolhido, é fundamental que haja sobreposição parcial de fotografias tiradas de posições diferentes, permitindo a triangulação.

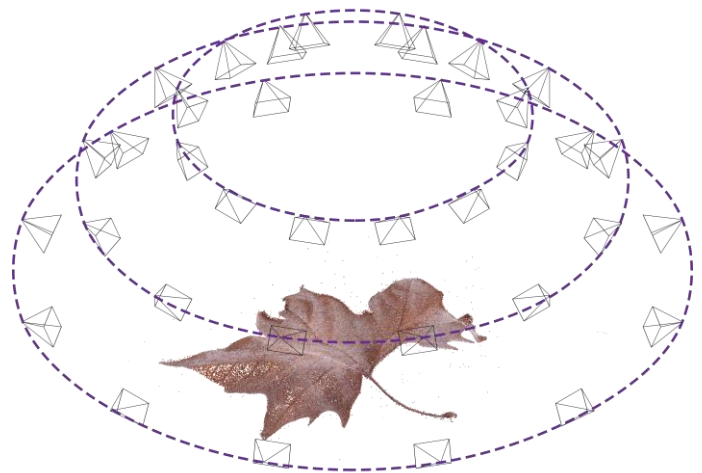


Fig. 66 Esquema de captura em órbita

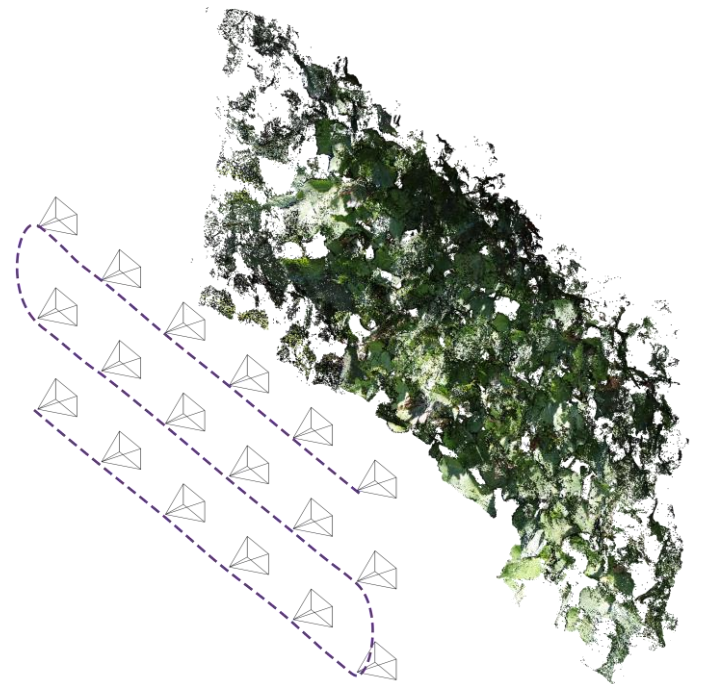


Fig. 67 Esquema de captura em percurso

Apesar de ser possível usar uma câmera de telemóvel, o resultado de uma fotogrametria é geralmente superior com máquinas fotográficas. Os telemóveis conseguem tirar fotografias com alta resolução graças à fotografia computacional, ou seja, através da computação digital em vez de processos óticos. A imagem capturada é alterada e, por isso, há menos garantia de correspondência entre imagens. Por outro lado, as máquinas fotográficas oferecem um maior controlo sobre as variáveis, como a abertura da lente, e uma imagem mais fiel à realidade. As principais recomendações para a utilização de uma máquina fotográfica em fotogrametria são:

- Usar a abertura mínima, ou seja, o número F no máximo, minimizando o deslocamento do plano de fundo para obter uma imagem totalmente focada;
- Colocar a sensibilidade do sensor de luz (ISO) no mínimo, diminuindo o ruído;
- Determinar a velocidade de captura no início de cada processo fotogramétrico e mantê-la para todas as fotografias, de modo a obter uma exposição constante;
- Utilizar um tripé, pois a estabilidade é fundamental e a captura das imagens pode demorar alguns segundos.

A luz também é fundamental no processo fotogramétrico, por influenciar muito a fotografia. Os programas de fotogrametria necessitam de uniformidade nas fotografias para conseguir interpretá-las e produzir uma nuvem de pontos. Uma vez que o processo fotogramétrico se baseia na correspondência das cores dos pixels entre várias imagens, as fotografias utilizadas têm de ter uma iluminação constante. É possível tirar fotografias para uma fotogrametria tanto com luz natural como artificial (Fig. 68), porém recomenda-se a segunda. Fotografar com iluminação natural é difícil, pois envolve muitas variáveis, como a rotação da Terra que altera as sombras projetadas pelo Sol com alguma rapidez. Para obter bons resultados com iluminação natural, as fotografias devem ser tiradas sem luz direta, como num espaço com janelas viradas a norte ou num dia nublado. Contrariamente, a iluminação artificial oferece mais controlo sobre o processo, gerando resultados mais previsíveis e potencialmente melhores.



Fig. 68 Iluminação do objeto capturado: à esquerda, luz natural; à direita, luz artificial

Uma vez que as fotografias têm um número de pixels finito, a sua resolução determina a densidade da nuvem de pontos. Por vezes é necessário ampliar a captura,

aproximando a câmera do objeto, para aumentar a quantidade de informação recolhida (Fig. 69 e Fig. 70).

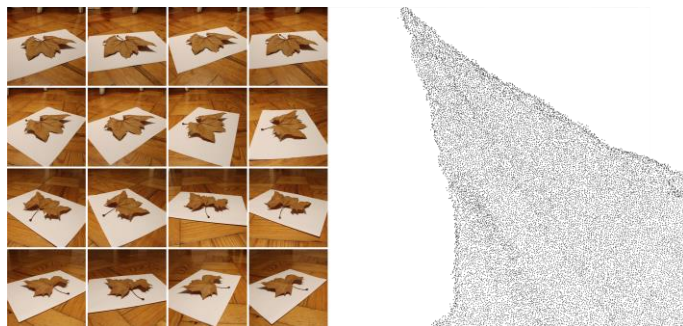


Fig. 69 Fotogrametria com baixa resolução: à esquerda, fotos distantes do objeto; à direita, a nuvem de pontos indefinida resultante

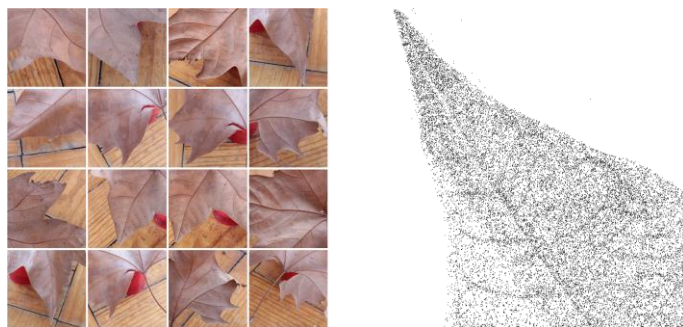


Fig. 70 Fotogrametria com elevada resolução: à esquerda, fotos próximas do objeto; à direita, a nuvem de pontos detalhada resultante

O número de fotografias necessário para obter bons resultados na fotogrametria varia bastante. Objetos pequenos ou com pouco detalhe podem ser digitalizados com cerca de 20 fotografias, enquanto objetos grandes ou com muito detalhe podem chegar às centenas. Geralmente, quantas mais imagens, melhor é o resultado, no entanto, pode-se chegar a um ponto em que a adição de mais fotografias não melhora significativamente a qualidade da reconstrução, mas aumenta o tempo de processamento, o que reduz a eficiência do processo.

Existem inúmeros programas de fotogrametria com diferentes vantagens e desvantagens. Nesta dissertação foi utilizado o Meshroom por ser um *software* de código aberto, ou *open-source* em inglês. Este programa, como quase todos os programas de fotogrametria, é bastante acessível. A configuração mais importante está no comando *FeatureExtraction*, onde se pode alterar a densidade e a qualidade do resultado, sendo necessário mais tempo para obter resultados melhores.

2.2.2. TRATAMENTO DIGITAL

O primeiro obstáculo que se encontra após o processo fotogramétrico ter sido concluído é a limpeza da sua informação tridimensional. Em fotogrametria é extremamente difícil capturar apenas o objeto pretendido, pois

as fotos recolhem a informação ao redor do objeto capturado, que também é processada. Assim, o chão em contacto com o objeto ou uma parede em segundo plano são trazidas para a nuvem de pontos. Apesar de existirem *softwares* de edição de nuvem de pontos, como o CloudCompare, a maior parte das fotogrametrias realizadas neste trabalho foram convertidas em malhas pelo próprio programa de fotogrametria, o Meshroom. Por conseguinte, usou-se um *software* próprio para edição de malhas, o Blender.

O chão é normalmente o elemento mais complicado de remover da malha, pois muitas vezes está em contacto com o objeto capturado. Com explica a Fig. 71, este pode ser removido pedindo ao *software* que selecione as faces complanares ao chão, com uma margem de variação pequena, uma vez que nem a realidade nem a informação fotogramétrica têm faces perfeitamente complanares. De seguida, dentro da seleção, removem-se as faces adjacentes a qualquer face do chão. O resultado deste método é uma malha aberta, o que pode ser problemático para alguns processos. Um programa de impressão 3D, por exemplo, necessita que as malhas importadas estejam fechadas. Para fechar o objeto, ainda no Blender, seleccionam-se as arestas nuas do mesmo e cria-se uma face.

Em suma, foi abordado o processo fotogramétrico, desde a captura das imagens até ao tratamento da nuvem de pontos. Destacou-se a importância da metodologia na captura de imagens para uma boa digitalização, mencionando métodos de captura em órbita e em percurso, além da necessidade de boas práticas com máquinas fotográficas. Foi realçada a influência da iluminação na qualidade das fotografias e, consequentemente, na resolução das nuvens de pontos. Posteriormente, estudou-se o tratamento digital pós-fotogramétrico, incluindo a limpeza da informação tridimensional, permitindo o processamento e a fabricação.

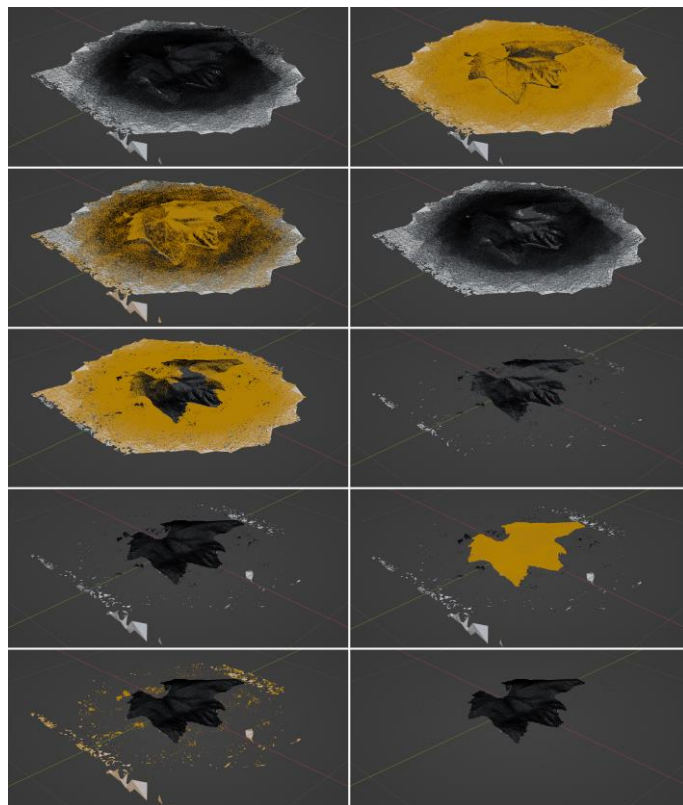


Fig. 71 Processo de remoção do chão da malha no Blender

2.3. CONCLUSÃO

Este trabalho utilizou a fotogrametria por ser a ferramenta mais acessível dentro da digitalização tridimensional. A fotogrametria, tal como a digitalização a laser, tem a capacidade de capturar elementos frágeis, pois nunca envolve o contacto com o objeto capturado. Esta característica revelou-se uma grande vantagem no trabalho, possibilitando a digitalização de objetos como folhas e flores.

A fotogrametria não é uma tecnologia recente, tendo sido inventada no século XIX. Esta técnica sofreu um grande salto evolutivo em meados do século XX, quando o computador automatizou vários processos lentos e complexos, como o reconhecimento da posição das câmeras. Desde então, esta tecnologia tem sido aplicada a várias áreas científicas e artísticas.

O workshop Photo 3D mostrou como a fotogrametria é uma ferramenta acessível e fácil de usar. Os participantes do mesmo foram capazes de capturar elementos naturais frágeis, apenas com uma simples introdução à tecnologia, um computador e um telemóvel. O workshop mostrou também que os arquitetos utilizam e planeiam continuar a usar a fotogrametria para um principal propósito: o levantamento. Por outro lado, os participantes

reconheceram o potencial desta tecnologia noutras aplicações, tal como no processo criativo.

O processo fotogramétrico é baseado nas fotografias, uma vez que toda a informação é gerada a partir das mesmas. Por conseguinte, estas são o principal fator na qualidade dos resultados fotogramétricos. Compreender o triângulo da exposição – que envolve o ISO, a abertura e a velocidade – é fundamental para obter bons resultados. As fotografias devem ser nítidas, reduzindo a abertura e o ISO, o que obriga também a reduzir a velocidade para obter uma boa exposição. A iluminação, por afetar as fotografias, é também uma variável fundamental no processo fotogramétrico. Os programas de fotogrametria necessitam de uniformidade nas fotografias de modo a conseguir corresponder pixels entre estas. Concluiu-se que a fotogrametria deve ser feita com luz artificial sempre que possível, uma vez que esta oferece um maior controlo sobre o processo.

A nuvem de pontos resultante de uma fotogrametria pode ser convertida numa malha, que é uma superfície constituída por triângulos. Os modelos digitalizados contêm muitas vezes elementos indesejados, como objetos em segundo plano que apareceram nas fotografias. Nesta dissertação foi utilizado o *software* Blender para remover estes elementos e fechar os modelos, pois este é um requisito de vários programas de fabricação digital.

3. MATERIALIZAÇÃO

Anteriormente abordou-se a temática de como fazer uma fotogrametria, sobrando agora o processamento e a materialização do objeto digitalizado. Utilizando o princípio da arquitetura biomórfica, este trabalho tinha como objetivo praticar a mimese. A ideia lançada foi tentar materializar elementos naturais como ornamento arquitetônico através de múltiplas técnicas de fabricação digital. Provou-se gerar diferentes tipos de ornamento, mostrando a diversidade de aplicações dos elementos naturais em arquitetura. As experiências executadas foram divididas de acordo com a morfologia dos modelos resultantes em três capítulos: volume, relevo e plano. Os capítulos começaram por explorar métodos de processamento e materialização dos objetos digitalizados. No final de cada um, o conhecimento adquirido foi aplicado com mais detalhe, usando como referência as técnicas de desenho e fabricação de projetos reais.

3.1. VOLUME

Um dos principais modos como a arquitetura contemporânea se expressa é através do próprio volume do edifício. Dentro do biomorfismo, existem vários edifícios que se inspiram em formas naturais para gerar elementos arquitetônicos, como o Centro Nacional de Convenções do Catar (Fig. 72) do arquiteto Arata Isozaki.



Fig. 72 Centro Nacional de Convenções do Catar, Arata Isozaki, 2011, Doha (Garrido, 2013)

Na fachada deste edifício grandes volumes em forma de árvore suportam um edifício que, excluindo este elemento, é bastante geométrico. O arquiteto japonês aumenta a escala das “árvores” propositadamente, provocando uma reinterpretação da escala da natureza. Assim, foi lançado o desafio de reproduzir elementos naturais como elementos arquitetônicos, influenciando o volume e reinterpretando a sua escala inicial.

3.1.1. DIFERENTES MÉTODOS DE PRODUÇÃO

Para compreender melhor a viabilidade deste processo e explorar o potencial das ferramentas de fabricação digital, foram feitos exercícios de réplica de um elemento natural. Tal como na escultura *evolution* de Yuko Oda, referida na página 28, esta experiência utilizou uma folha seca (Fig. 73 e Fig. 74), tendo como objetivo reconstruir a mesma com o mínimo de processamento digital. Os métodos escolhidos para a sua materialização foram a impressão 3D, a moldagem e a fresagem, que resultou em modelos feitos de plástico PLA, gesso e madeira, respetivamente. Estes três métodos têm as suas próprias vantagens e desvantagens e resultam em objetos distintos.



Fig. 73 Nuvem de pontos resultante da fotogrametria da folha seca

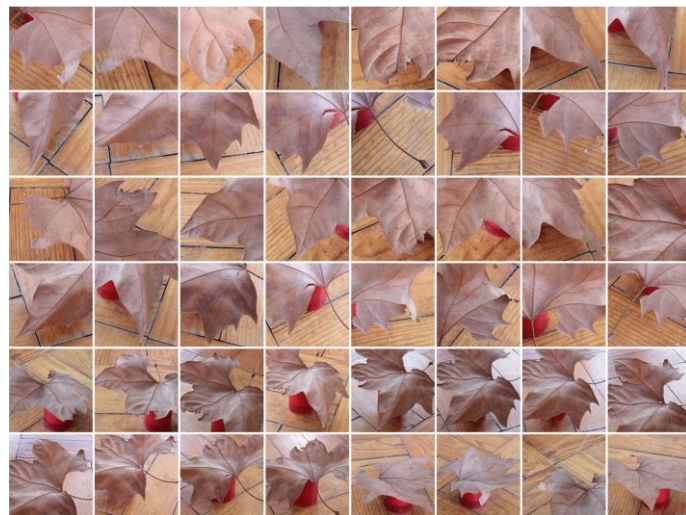


Fig. 74 Amostra das fotografias utilizadas na fotogrametria da folha seca

Vários métodos de fabricação digital têm limitações quanto à materialização dos modelos 3D. Uma impressora 3D, por exemplo, para além do seu tamanho, está limitada pelas saliências e concavidades do modelo. Como a impressão é um processo que produz peças de baixo para cima, novas camadas não podem começar fora da projeção vertical da camada anterior sem suporte. Existe uma certa tolerância a esta regra, uma vez que quase todas as impressoras 3D conseguem imprimir saliências com ângulos inferiores a 45 graus em relação ao eixo Z (Fig. 75). Este ângulo corresponde ao momento em que cada camada está em cerca de 50% de contacto com a camada inferior e, por conseguinte, é possível imprimir.

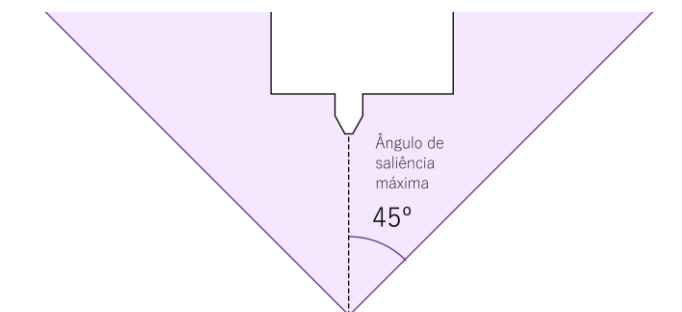


Fig. 75 Esquema de ângulo máximo de impressão numa impressora 3D

Com esta limitação em mente, considerou-se favorável tirar fotografias apenas de alguns ângulos de modo a obter uma digitalização com concavidades e saliências menos acentuadas. Quanto menor for o ângulo de captura, mais fácil se torna a impressão do modelo digitalizado, evitando um pós-processamento digital. O ângulo de captura, tal como o ângulo de saliência, é medido em relação à direção perpendicular ao plano do objeto, que muitas vezes é o chão. Assim, ao digitalizar-se um objeto que se pretende imprimir, o ângulo máximo de captura deve ser cerca de 45°, correspondendo ao ângulo máximo de saliência. A Fig. 76 mostra como o ângulo de captura influencia as saliências do modelo resultante.

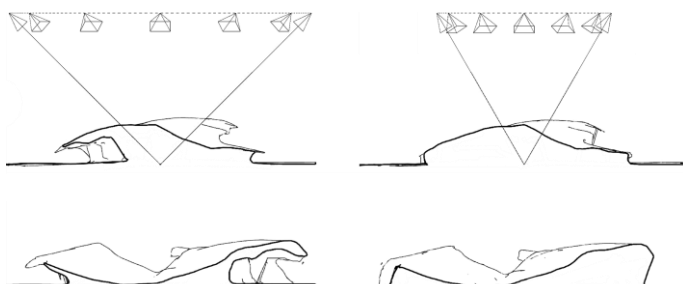


Fig. 76 Esquema da relação entre a captura e saliências do modelo: à esquerda, um ângulo de captura superior resultou em saliências acentuadas; à direita, um ângulo inferior minimizou as mesmas

Pelo modo como a fotogrametria foi executada, praticamente todo o modelo da folha seca não ultrapassou os

45 graus de saliência, facilitando a sua fabricação. Onde ultrapassou foram adicionados suportes, ou seja, peças que apoiam novas camadas que podem ser removidas pós-impressão. O modelo fechado da folha seca foi exportado para um *software* de impressão 3D, o UltiMaker Cura, onde foi transformado em camadas e ao qual foram adicionados suportes (Fig. 77). Seguidamente, iniciou-se o processo de impressão (Fig. 78) que, ao fim de 15 horas, resultou num modelo físico em plástico PLA (Fig. 79).

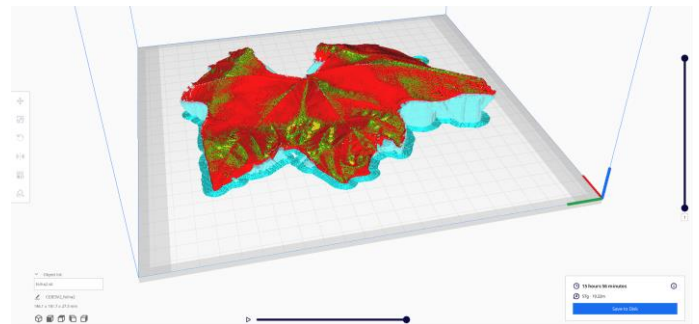


Fig. 77 Modelo da folha seca fatiado no UltiMaker Cura

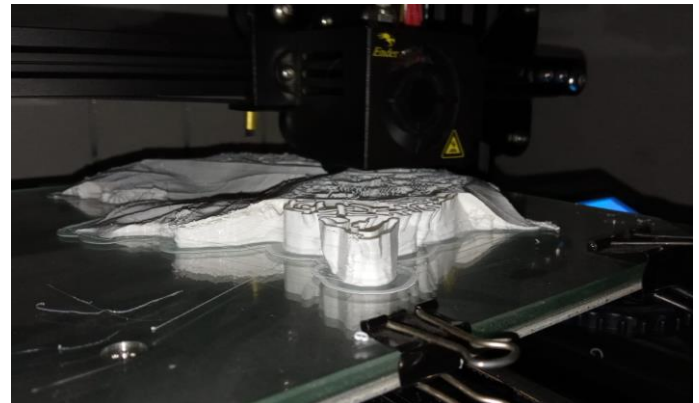


Fig. 78 Processo de impressão da folha seca numa impressora 3D Creality Ender 3



Fig. 79 Folha seca impressa em plástico PLA

Para a moldagem da folha seca utilizou-se um modelo impresso em plástico como molde para o gesso. A moldagem, contrariamente à impressão 3D, não pode ter saliências, pois estas impedem a remoção do molde. Portanto, a malha foi extrudida no Blender com base no contorno da superfície superior da folha seca.

Após ser exportada para o Cura, foram utilizadas definições que geraram um negativo do próprio objeto, ou seja, um molde. Após a impressão em PLA do mesmo, foi aplicado óleo no plástico, de modo a facilitar a remoção da peça, e despejado gesso que ficou a secar durante 3 dias (Fig. 80). Após este período, partiu-se o molde de plástico e retirou-se a réplica da folha seca em gesso (Fig. 81).

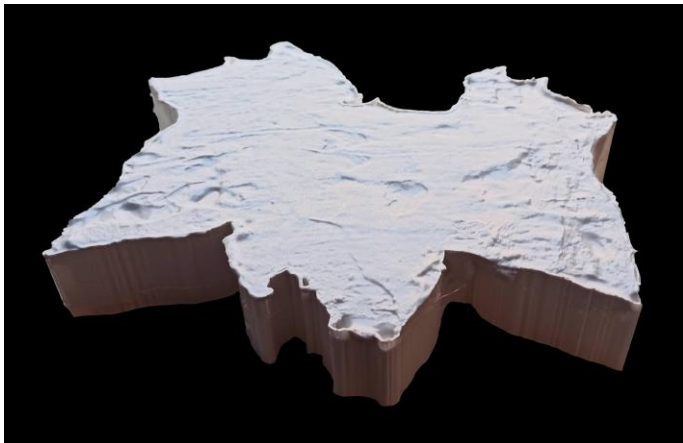


Fig. 80 Molde da folha seca em plástico PLA contendo gesso líquido



Fig. 81 Folha seca em gesso após ser removida do molde

Por último, de modo a fresar madeira com a forma da folha, foi utilizado o mesmo modelo extrudido da folha seca. Várias fresadoras CNC conseguem produzir saliências, mas a que foi utilizada neste trabalho não tinha esta capacidade. Com o auxílio dos técnicos do FabLab Lisboa, a folha seca foi reproduzida em madeira (Fig. 82 e Fig. 83), utilizando uma fresa de 6mm de diâmetro para desbaste e 3mm para detalhe.



Fig. 82 Fresagem da folha seca no FabLab Lisboa



Fig. 83 Folha seca fresada em madeira

3.1.2. REINTERPRETAÇÃO DA ESCALA

Numa fase seguinte, imaginou-se o objeto capturado com outra escala, como o volume de um edifício. Para tal, foi estudado o Metropol Parasol (Fig. 84 e Fig. 85), uma enorme cobertura de madeira numa praça em Sevilha, desenhado pelo arquiteto Jürgen Mayer-Hermann. O projeto tinha como objetivo proteger os utilizadores da praça da luz direta, assim como criar uma referência arquitetónica para a cidade. O resultado é uma forma intrincada apelidada pelos locais de *setas*, que significa cogumelos em espanhol (Mayer, 2012).

A cobertura do Metropol Parasol é uma estrutura em *waffle*, baseada num método construtivo que explora uma forte condicionante da fabricação digital – a dependência de métodos de fabricação bidimensionais. Este problema é ultrapassado cortando um objeto tridimensional em grelha, o que resulta numa série de “fatias” que podem ser produzidas bidimensionalmente.



Fig. 84 Cobertura do Metropol Parasol, Jürgen Mayer H. Architects, 2011, Sevilha (Franck, 2011)

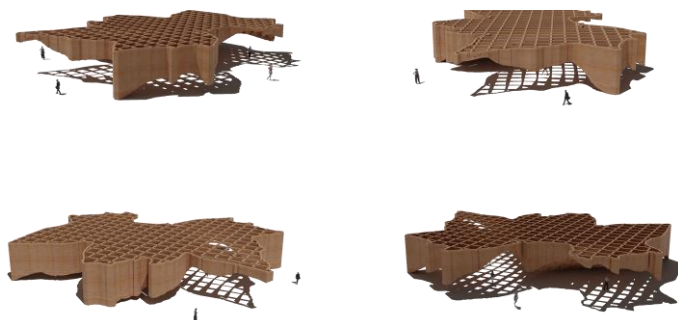


Fig. 86 Renders da cobertura com a forma da folha seca



Fig. 87 Fotografia da estrutura em *waffle* da folha seca impressa em plástico PLA

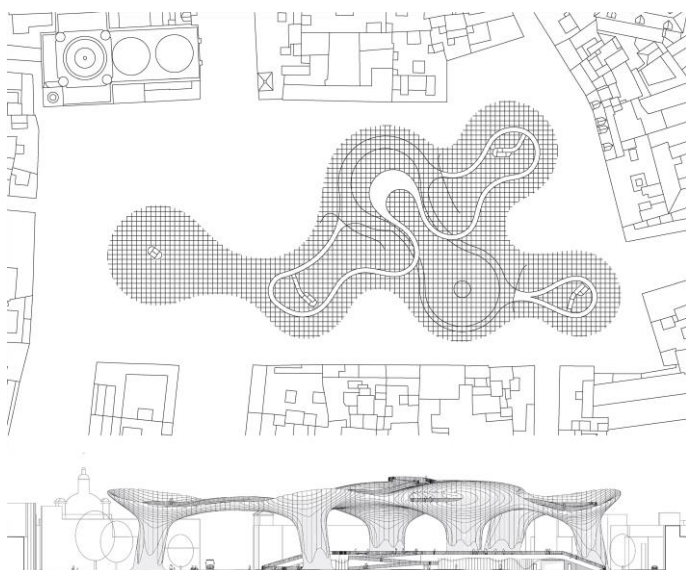


Fig. 85 Planta e alçado do Metropol Parasol (Mayer, sem data)

Utilizando o modelo anterior da folha seca, foi estudada a possibilidade de transformar uma malha fechada numa estrutura em *waffle*. Assim, utilizando a ferramenta Grasshopper do *software* Rhino, foi projetada uma grelha no modelo 3D, fatiando o mesmo. Ao dar-se espessura às fatias, formou-se uma estrutura em *waffle*, à qual se adicionou um perímetro que realçava a forma da folha. Imaginou-se esta estrutura como uma folha ao contrário, na qual o Homem habita à escala de uma formiga (Fig. 86). Pelo facto de a estrutura ser plana na parte superior, a sua sombra revela a tridimensionalidade da folha, variando o tamanho da projeção da luz no piso que cobre. Para melhor entender o fenómeno de sombreamento, a estrutura foi impressa como uma peça única em plástico (Fig. 87).

Pegando na alusão aos cogumelos presente no Metropol Parasol, o desafio seguinte foi construir uma estrutura em *waffle* com peças montáveis. A ideia foi não depender de uma interpretação geométrica gerada computacionalmente, tal como acontece na estrutura de Sevilha, mas sim utilizar um conjunto de cogumelos digitalizados (Fig. 88) na criação da estrutura.

As peças foram desenhadas para encaixar com recortes virados para baixo numa direção e recortes virados para cima na outra (Fig. 89). Como se trata de uma grelha extrudida verticalmente, as interseções entre os planos são sempre linhas verticais. Metade desta linha vertical corresponde ao comprimento do encaixe, ou seja, as reentrâncias vão sempre até à metade da peça.



Fig. 88 Nuvem de pontos do conjunto de cogumelos

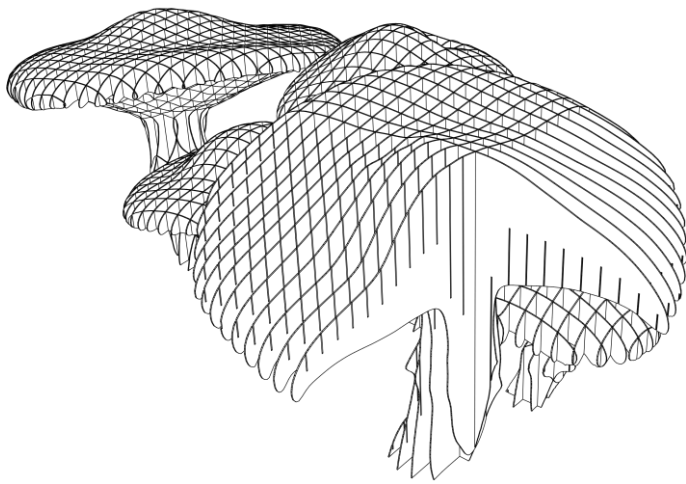


Fig. 89 Esquema de encaixes da estrutura em *waffle*

Com o *plugin* OpenNest do Grasshopper, fez-se um *nesting* das peças para que estas pudessem ser cortadas utilizando o mínimo material possível (Fig. 90). Foi necessário também organizar e numerar as peças de modo a facilitar o processo de montagem (Fig. 91). O método de produção e o material escolhidos foram o corte a laser e cartão de 1mm. Escolheu-se uma escala hipotética de 1/50 para a criação da maquete (Fig. 92), usando como referência as dimensões da estrutura em Sevilha.

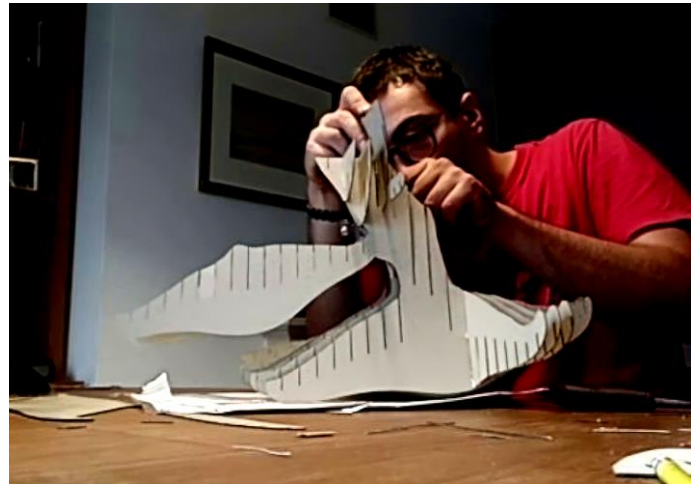


Fig. 91 Processo de montagem

Em síntese, através das experiências da folha seca, entendeu-se que partindo do objeto digitalizado é relativamente simples replicar e materializar formas naturais. Uma aplicação possível da réplica de um objeto natural na arquitetura é no desenho da forma de um edifício. O Metropol Parasol mostra como uma forma natural, como os cogumelos, podem influenciar o volume de uma construção. Ao utilizar a ideia desta estrutura, mas com cogumelos digitalizados, gerou-se uma cobertura mais mimética.

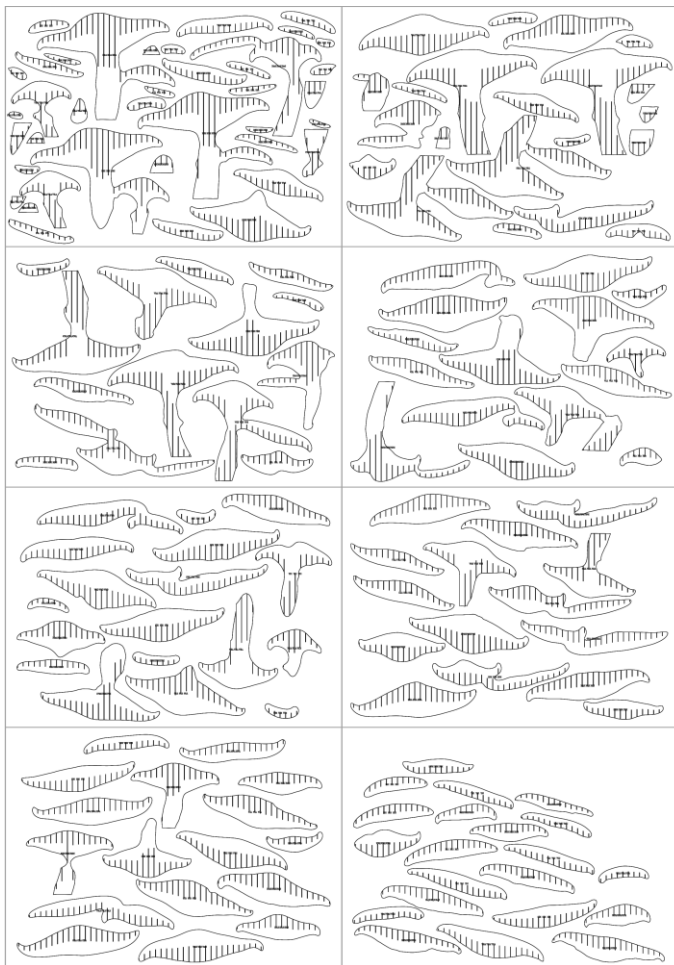


Fig. 90 *Nesting* das peças dos cogumelos



Fig. 92 Maquete de cogumelos em cartão prensado

3.2. RELEVO

Uma das características mais importantes do ornamento é sua aplicação em superfícies, especialmente a uma escala mais próxima do utilizador/observador. Este modo de ornamentar é mais semelhante ao ornamento tradicional e é menos frequente na arquitetura contemporânea. Desta forma, o desafio seguinte foi possibilitar que um objeto digitalizado fosse aplicado a uma superfície, dando-lhe relevo.

3.2.1. COMPOSIÇÃO NATURAL

Num primeiro momento, foram feitas experiências com a folha seca do capítulo anterior, formando objetos com diferentes relevos (Fig. 93). No entanto, chegou-se à conclusão que gerar uma superfície constituída por vários elementos vegetais é um processo complicado. A complexidade de um monte de folhas é difícil de simular digitalmente, pois processos como a colisão e deformação exigem bastante poder computacional.

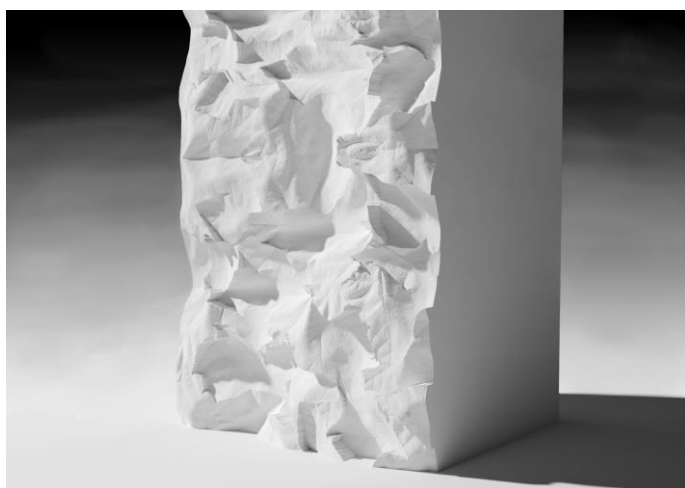


Fig. 93 Coluna com negativo de várias folhas secas

Pela dificuldade que é, digitalmente, criar uma superfície a partir de um objeto repetido, surgiu a vontade de copiar um relevo complexo já existente na natureza. Foi então digitalizada uma hera num muro de jardim (Fig. 94 e Fig. 95) de modo a obter um conjunto de folhas disposto naturalmente. Deste modo, não foi necessário resolver digitalmente problemas de física, uma vez que a realidade integra e resolve estes problemas automaticamente.



Fig. 94 Nuvem de pontos resultante da fotogrametria da hera



Fig. 95 Amostra das fotografias utilizadas na fotogrametria da hera

Para conseguir espalhar o modelo 3D numa superfície é necessário transformá-lo numa textura digital. No contexto de programas de modelação, as texturas podem ser usadas para criar uma grande variedade de efeitos na superfície dos objetos a partir da cor. As texturas são imagens bidimensionais que podem conter informação tridimensional, adicionando detalhes como saliências, concavidades ou orifícios às superfícies onde são aplicadas.

No Blender, a partir de uma textura é possível alterar uma malha com o modificador *displacement*, ou deslocamento em português, que desloca vértices com base na informação cromática. O deslocamento pode ser feito ao longo de um eixo local específico ou ao longo da normal dos vértices da malha. A principal vantagem de utilizar o deslocamento a partir de uma textura é o facto de a informação tridimensional ser aplicada automaticamente, independentemente da escala e da complexidade da forma do objeto. Além do mais, esta pode ser repetida em grandes superfícies de um modo subtil, parecendo uma só.

Nesta experiência, o método de conversão para textura escolhido foi o mapa de profundidade. Este corresponde a uma imagem que fornece a informação da distância do objeto à câmera, normalmente a partir de uma escala de cinzentos (Fig. 96). Como os mapas de profundidade são uma projeção, estes não fornecem informação sobre as concavidades do objeto. Esta característica é uma vantagem nesta situação, pois o modelo da hera é muito frágil e complexo, necessitando de alguma simplificação para poder ser materializado. O mapa de profundidade foi gerado a partir da ferramenta *mist** do Blender.

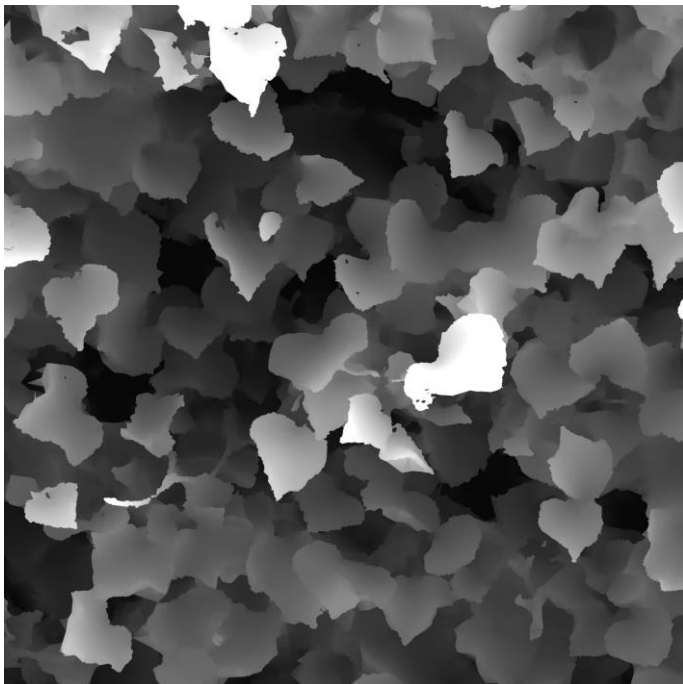


Fig. 96 Mapa de profundidade do modelo 3D da hera

Uma textura é apenas uma imagem, normalmente um quadrado, que pode ser repetida numa superfície através do mapeamento. Todavia, existe a dificuldade de transformar esta repetição em algo contínuo e despercebido. As texturas que conseguem alcançar este efeito chamam-se *seamless*, que significa “sem costuras”.

O primeiro passo para criar este tipo de textura foi recortar o mapa de profundidade no Photoshop, seguindo o contorno das folhas (Fig. 97). De seguida, foi utilizado o programa Materialize para transformar o mapa de profundidade numa textura *seamless* (Fig. 98). Este programa também gera mapas de normais, que indicam a normal de cada face da malha, removendo o efeito dos degraus causado pelo mapa de profundidade.

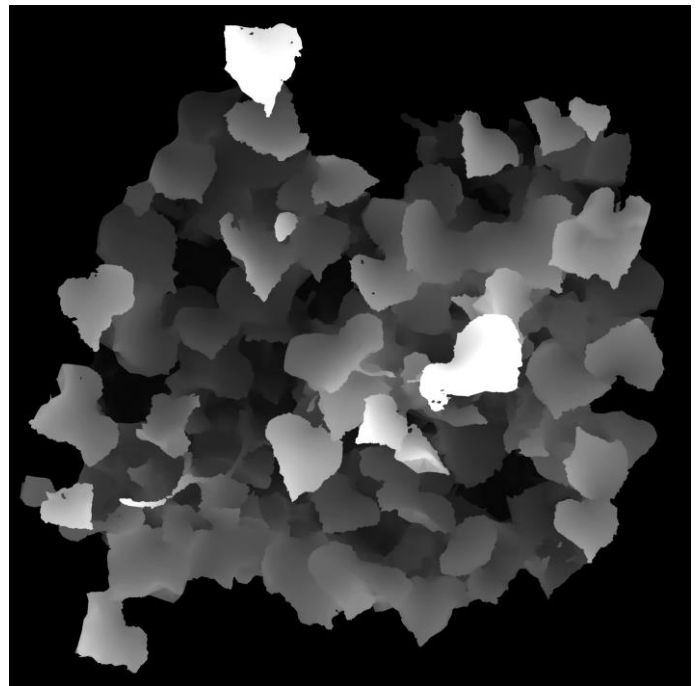


Fig. 97 Mapa de profundidade recortado

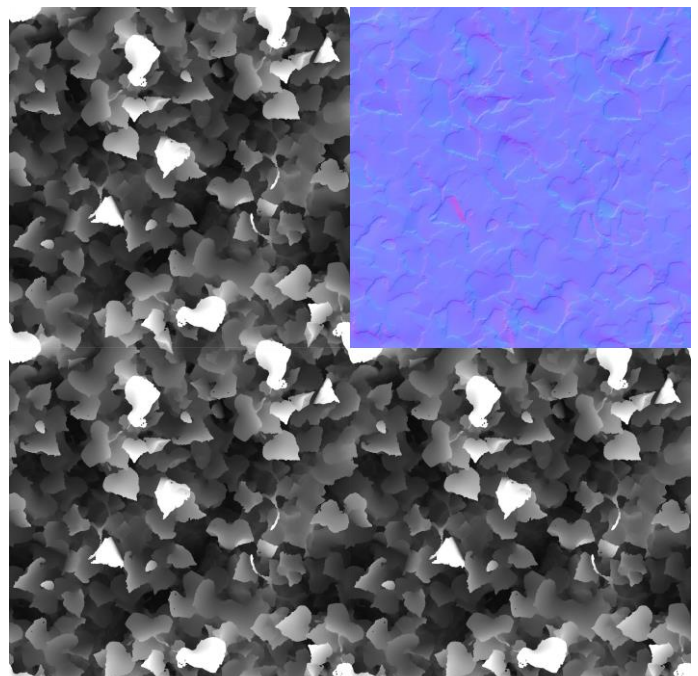


Fig. 98 Textura resultante mapeada em 4 quadrados: no canto superior direito, um mapa de normais; nos restantes quadrantes, um mapa de profundidade sem descontinuidades

O deslocamento com base nestas imagens foi materializado numa superfície plana em gesso, utilizando o mesmo método que na folha seca, e numa superfície curva em PLA (Fig. 99). Os dois são compostos por uma repetição da textura que não é imediatamente reconhecível.

* O *mist* é uma ferramenta que serve para reforçar a sensação de profundidade num *render*. Esta funciona como um mapa de profundidade, mas com transparência em vez de uma escala de cinzentos – quanto mais afastado está um objeto, mais transparente. Por funcionar com o mesmo princípio, esta ferramenta pode gerar mapas de profundidade.

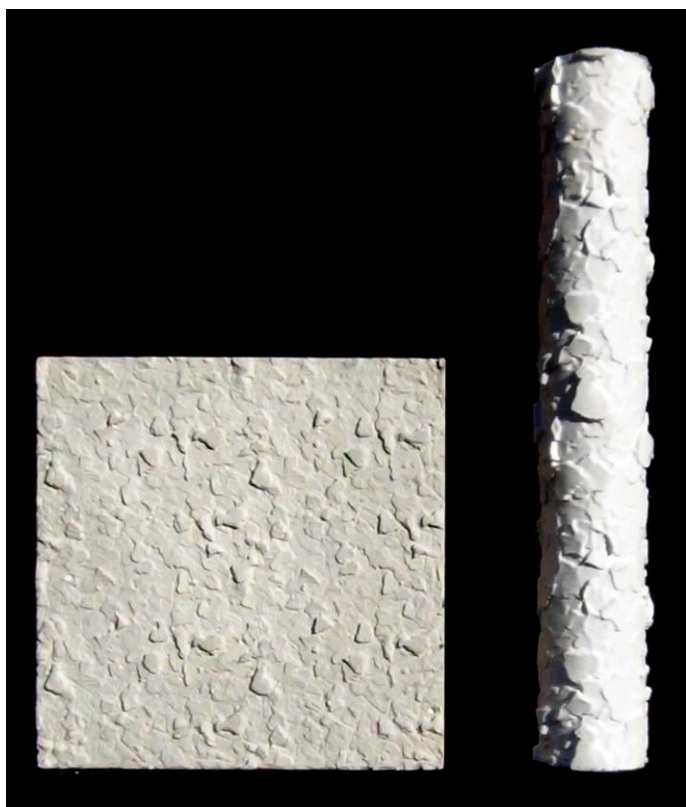


Fig. 99 Maquetes resultantes da utilização do mapa de profundidade do grupo de folhas: à esquerda, um painel de gesso; à direita, uma coluna impressa em PLA

3.2.2. COMPOSIÇÃO ANALÓGICA

A digitalização da hera mostra como é possível materializar um relevo encontrado na natureza. Contudo, este método está muito condicionado pelas circunstâncias do objeto capturado. Uma composição natural não pode ser modificada e pode ter elementos indesejáveis. A hera capturada tinha uma grande variação de alturas que dificultou a sua materialização. Por esta razão, na experiência seguinte procurou-se controlar a composição dos objetos naturais, mantendo o benefício da realidade enquanto ferramenta de cálculo de colisões e deformações. O objeto capturado foi um grupo de folhas (Fig. 100 e Fig. 101) disposto na composição desejada. Foi possível explorar a capacidade de alterar o objeto digital manipulando, analogicamente, cada folha. Para além da possibilidade de alterar o resultado digital de um modo prático e direto, este método beneficia de poder ser aplicado em estúdio.

O brilho, o reflexo e a transparência na superfície dos objetos a digitalizar são um obstáculo à fotogrametria, pois estas características não podem ser capturadas através desta técnica. A solução passa muitas vezes por aplicar uma substância baça, como tinta ou pó, na superfície do objeto. Uma vez que as folhas capturadas tinham algum brilho, foi aplicada uma camada fina de farinha sobre as mesmas.



Fig. 100 Nuvem de pontos resultante da fotogrametria do grupo de folhas



Fig. 101 Amostra das fotografias utilizadas na fotogrametria do grupo de folhas

Como foi demonstrado na experiência anterior, os mapas de profundidade têm muita utilidade na transformação e simplificação da informação tridimensional numa textura. Todavia, esta simplificação nem sempre é desejada, pois a existência de saliências e concavidades é importante na leitura do objeto (Fig. 102). Para evitar o uso do mapa de profundidade, a captura do grupo de folhas foi feita com um ângulo de captura pequeno. Como foi referido anteriormente, esta técnica permite obter reentrâncias não muito acentuadas e, consequentemente, facilitar a sua fabricação.

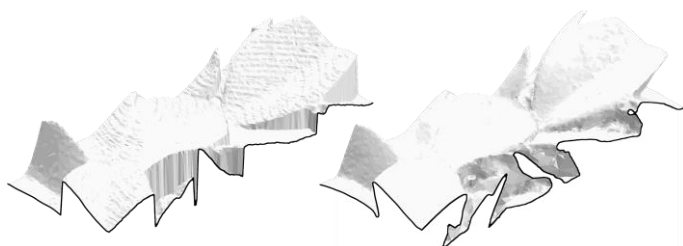


Fig. 102 Saliências dos modelos 3D: à esquerda, uma malha modificada pelo mapa de profundidade; à direita, o modelo original

Em vez do mapa de profundidade, a malha resultante da fotogrametria do grupo de folhas foi diretamente usada para dar relevo a superfícies (Fig. 103). No Blender, o modelo fechado foi multiplicado e disposto em grelha numa superfície plana com rotações diferentes, alcançando um relevo sem descontinuidades. O mesmo modelo foi torcido em torno de um cilindro, com o modificador *simple deform*, e espelhado para dar a mesma sensação.

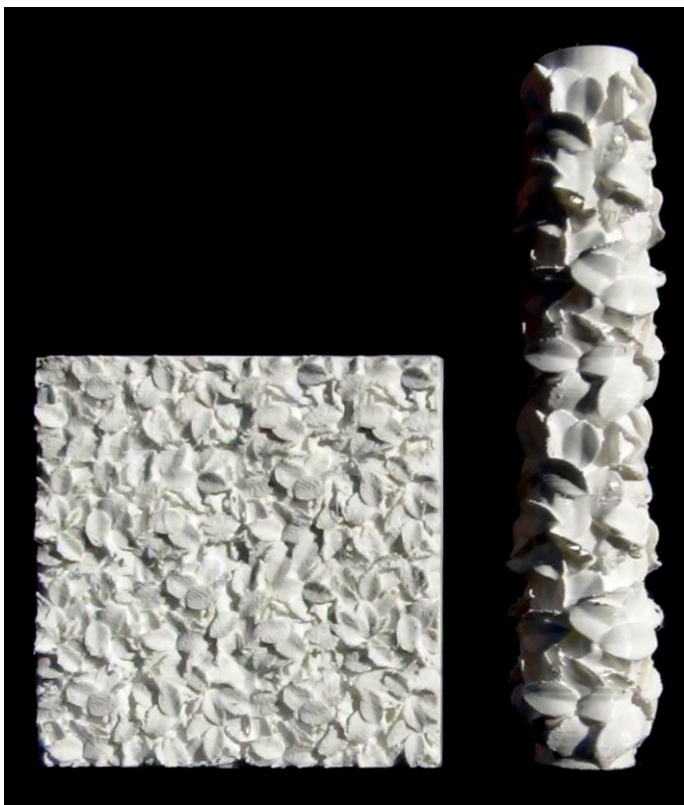


Fig. 103 Maquetes resultantes da disposição manual do grupo de folhas: à esquerda, um painel impresso em PLA; à direita, uma coluna impressa em PLA

No entanto, este processo de adaptação de uma malha a uma superfície é um trabalho digital lento e repetitivo – para cada elemento que se pretende ornamentar é necessário ajustar a malha às suas características. A textura digital, introduzida com o mapa de profundidade, oferece um modo de transformar um modelo 3D numa superfície mais automático. Será que existe uma imagem semelhante ao mapa de profundidade capaz de transmitir informação sobre as reentrâncias de um objeto, tirando partido da textura digital?

A resposta a esta pergunta é o mapa de deslocamento vetorial (VDM, de *vector displacement map*). Este mapa permite que o deslocamento possa ser feito através dos componentes RGB, criando vetores para cada vértice. As cores vermelho, verde e azul deslocam os vértices da malha nas direções X, Y e Z, respetivamente. Um VDM contém informação não visível correspondente ao negativo das cores. Na Fig. 104 pode-se ver como o eixo X corresponde ao vermelho e o Y ao verde, sendo que a sua mistura no primeiro quadrante resulta em amarelo. O quadrante oposto é apenas preto, pois os valores negativos do vermelho e do verde não são representáveis em cores visíveis.

Num mapa de deslocamento vetorial tem de ser utilizado o formato EXR, pois o JPEG e o PNG são formatos de imagem usados em computação gráfica e fotografia

digital. Estes foram concebidos principalmente para armazenar imagens de forma compacta, mantendo a qualidade visual. Contudo, estes não são capazes de armazenar informações de ponto flutuante ou valores negativos nos seus pixels. O formato EXR, por outro lado, é um formato de imagem de alto alcance dinâmico (HDR), suportando um amplo intervalo de valores de pixel, incluindo números de ponto flutuante que podem ser negativos. Esta característica é ideal para armazenar informações detalhadas sobre deslocamentos vetoriais.

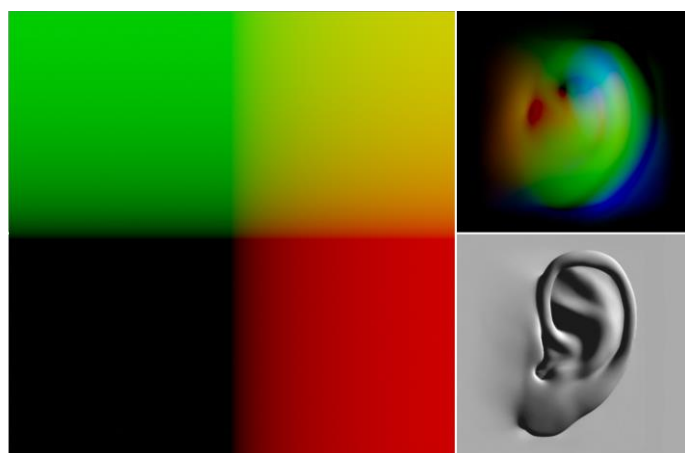


Fig. 104 Mapa de deslocamento vetorial: à esquerda, o sistema de cores utilizado no plano XY para indicar o deslocamento de cada vértice (imagem do autor); à direita, um VDM de uma orelha e o modelo 3D resultante (Autodesk, sem data)

O VDM é normalmente utilizado como uma ferramenta auxiliar na modelação digital. Ao esculpir um objeto, muitas vezes o mesmo detalhe tem de ser usado várias vezes. Tal como um pincel do Photoshop, o VDM serve como um modo rápido de trazer este detalhe para uma malha. Por ser direcionado aos artistas digitais, o VDM foi pensado para ser desenhado de origem, começando a partir de uma malha lisa. Os programas que geram este mapa comparam a posição inicial e final dos vértices, criando as cores de acordo com os vetores de deslocamento. Esta característica dos programas que geram VDMs revelou-se problemática, pois pretendia-se gerar este mapa a partir de uma malha existente.

Foi necessário encontrar um modo de gerar uma malha igual à do objeto digitalizado partindo de uma malha plana. Como mostra o esquema da Fig. 105, o modo de resolver este problema foi projetar verticalmente uma malha plana no conjunto de folhas, obtendo um resultado semelhante a um mapa de profundidade. De seguida, subdividiu-se a malha projetada e deslocaram-se os vértices da mesma para os pontos mais próximos no conjunto de folhas. Com este método, o software conseguiu gerar um VDM (Fig. 106), pois tinha acesso à posição inicial e final de todos os vértices da malha projetada.

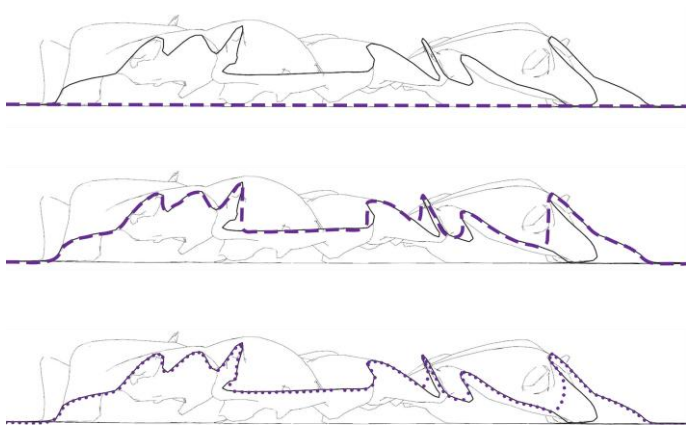


Fig. 105 Processo de adaptação de uma malha plana ao relevo do grupo de folhas

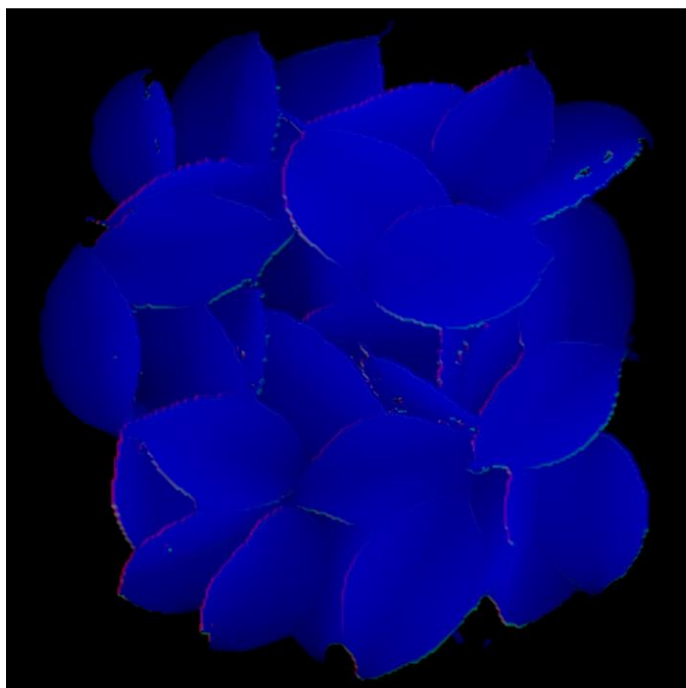


Fig. 106 Mapa de deslocamento vetorial do grupo de folhas

Contrariamente ao mapa de profundidade, o VDM não pode ser transformado numa textura sem discontinuidades com o auxílio do programa Materialize, pois este apenas trabalha com PNG e JPEG. Por conseguinte, o VDM foi processado manualmente no Photoshop de modo a formar este tipo de textura (Fig. 107). Os modelos criados a partir deste processo foram materializados por uma impressora 3D, pela sua capacidade de fabricar objetos com reentrâncias e saliências (Fig. 108).

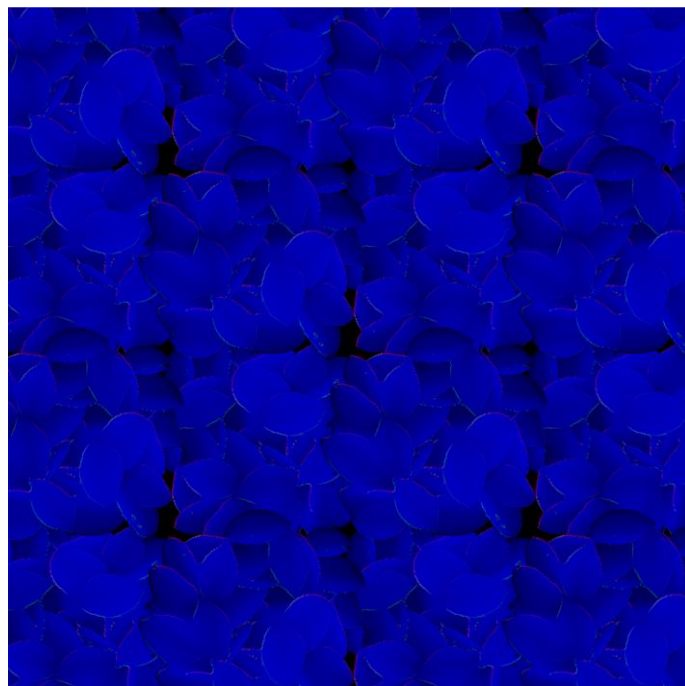


Fig. 107 Textura do mapa de deslocamento vetorial do grupo de folhas

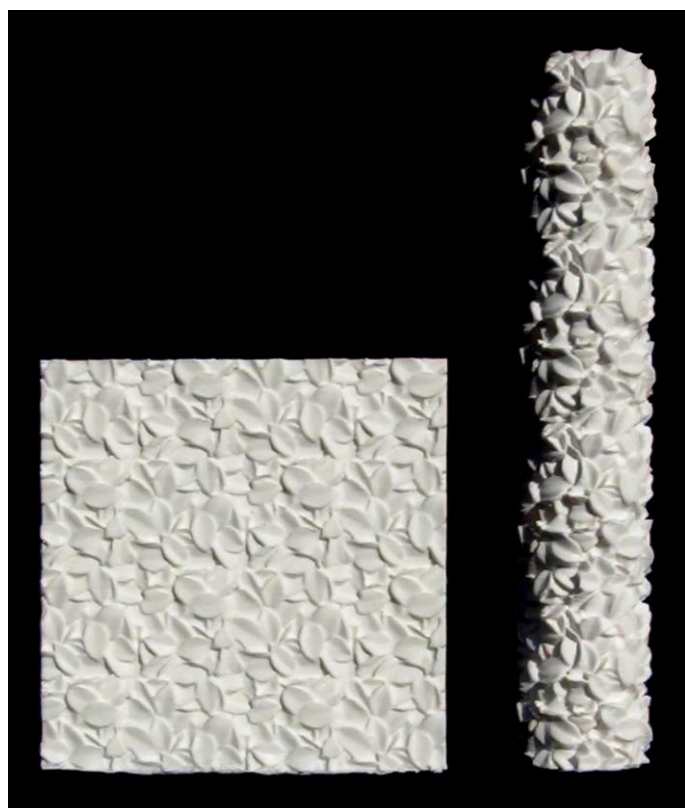


Fig. 108 Maquetes resultantes da utilização do VDM do grupo de folhas: à esquerda, um painel impresso em PLA; à direita, uma coluna impressa em PLA

3.2.3. RELEVO COMO ESTRUTURA

A terceira experiência deste capítulo teve como objetivo interpretar o relevo de um objeto digitalizado, usando como inspiração a Mediateca de Sendai (Fig. 109). O edifício desenhado pelo arquiteto Toyo Ito, utiliza elementos de forma a criar a ilusão de uma estrutura fluante, sendo constituída por "placas", planos separados pelo espaço que se apoiam apenas em alguns pontos; "tubos", colunas "semelhantes a árvores" na sua

natureza; e uma "pele", uma fina membrana transparente (Hildner, 2013). Apesar dos tubos terem sido desenhados com base na forma de algas (Fig. 110), o resultado remete para uma floresta metálica que, exclusivamente, suporta e conecta vários pisos. Esta estrutura assemelha-se às ranhuras da casca de uma árvore, dada a espessura reduzida dos tubos metálicos que realçam mais os vazios que os cheios.

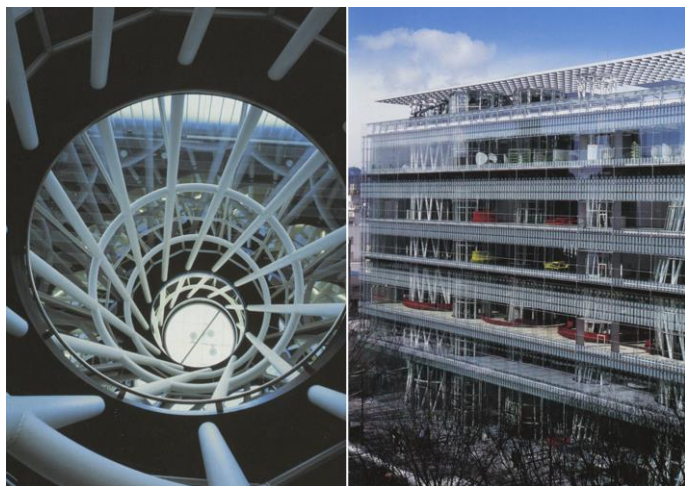


Fig. 109 Mediateca de Sendai, Toyo Ito, 2001, Sendai (Electa Architecture, 2013)

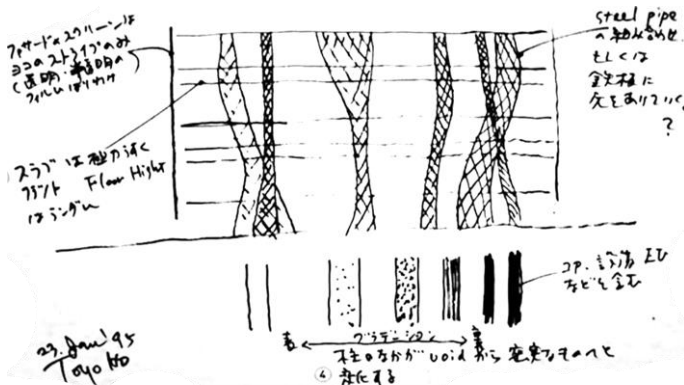


Fig. 110 Esquisto da estrutura da Mediateca de Sendai (Ito, 1995)

Do mesmo modo, nesta experiência foram utilizadas as reentrâncias de um tronco digitalizado para simular o efeito que a Mediateca de Sendai provoca. O objeto escolhido foi um tronco de pinheiro (Fig. 111) por ser uma árvore autóctone portuguesa e pelas suas ranhuras profundas, o que facilitou o processamento e a interpretação do objeto digitalizado. O principal desafio desta experiência foi o reconhecimento digital das ranhuras do tronco para transformar as reentrâncias da malha em tubos metálicos.



Fig. 111 Nuvem de pontos resultante da fotogrametria do tronco de pinheiro



Fig. 112 Amostra das fotografias utilizadas na fotogrametria do tronco de pinheiro

O modo de responder a este desafio foi através do reconhecimento dos pontos mais interiores do tronco com o auxílio do Rhino Grasshopper (Fig. 113). A partir da malha gerada pelo Meshroom (A), o tronco foi seccionado por planos horizontais em várias alturas equidistantes. Para cada uma destas seções foi encontrado um centro (B), a partir do qual foram selecionados os pon-

tos mais próximos do mesmo. Como as ranhuras na realidade não são lineares, tratando-se de reentrâncias com uma espessura variável, foi necessário filtrar os pontos por proximidade, deixando apenas um por ranhura.

O resultado é um conjunto de pontos que indica a posição das ranhuras nas alturas em que o tronco foi seccionado (C). Ligando cada um dos pontos ao ponto mais próximo acima e abaixo, obtêm-se duas linhas por ponto. O conjunto destas linhas é uma rede simplificada da localização das reentrâncias do tronco (D). Dando espessura a esta rede, começa-se a obter o efeito que a estrutura metálica da Mediateca de Sendai provoca (E). Por fim, de modo a reforçar as “ranhuras” foi adicionada uma estrutura horizontal onde existem mudanças de direção.

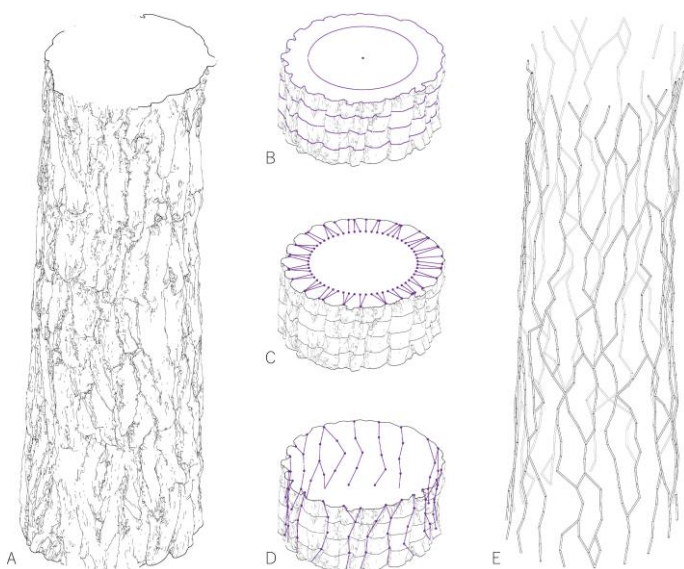


Fig. 113 Esquema do processamento do tronco de pinheiro

O modelo 3D foi seccionado e impresso em PLA (Fig. 114 e Fig. 115) à escala 1/50 com base nas medidas do projeto original. O resultado é uma estrutura que sugere o objeto inicial, ou seja, um tronco.

Em suma, exploraram-se duas possibilidades de disposição de um conjunto de folhas, a composição natural e analógica, que foram capturados e transformados em relevos com diferentes técnicas. O mapa de profundidade ofereceu um bom equilíbrio entre facilidade de produção e detalhe, especialmente ao ser combinado com um mapa de normais. O VDM acrescentou mais detalhe ao relevo da superfície, mas descobriu-se que não existe um modo de fácil de ser gerado a partir de uma malha existente. Contudo, os dois métodos são praticáveis e oferecem um modo de espalhar informação tridimensional numa superfície. Por fim, o relevo de um

tronco digitalizado foi interpretado, gerando uma estrutura semelhante às “árvores” da Mediateca de Sendai.

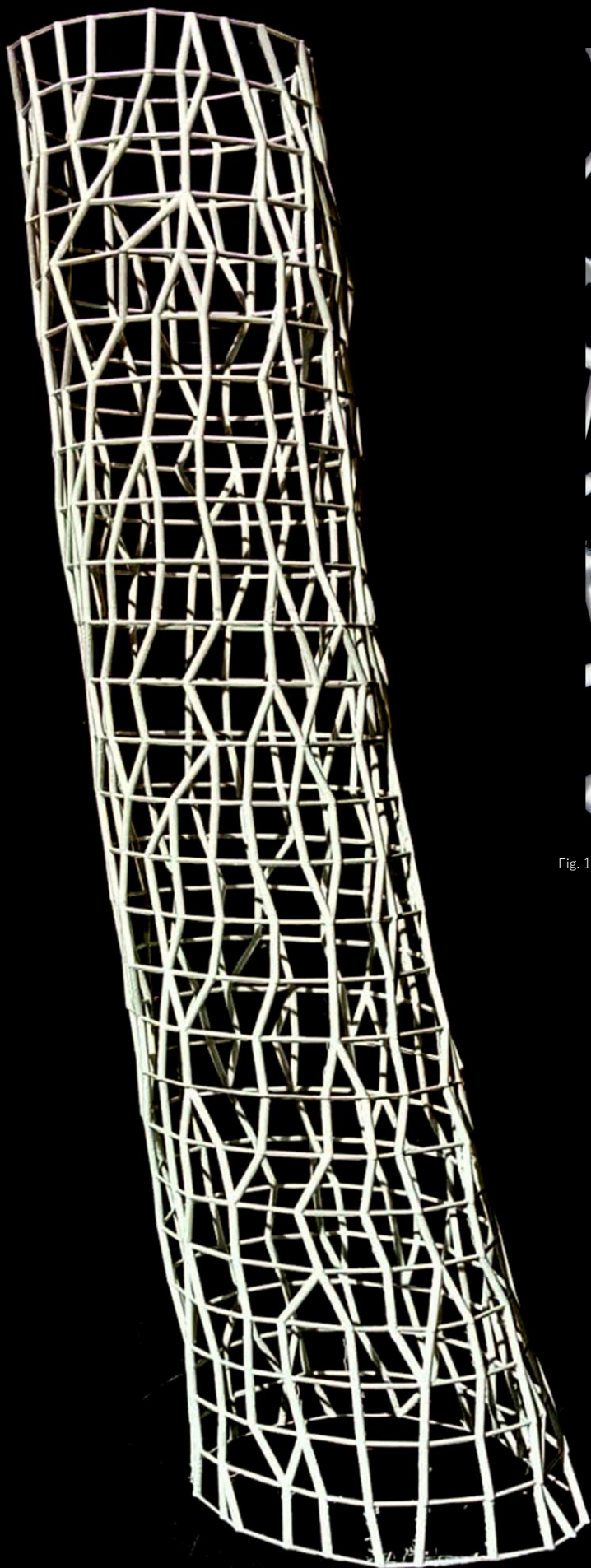


Fig. 114 Vista lateral da maquete do tronco de pinheiro impressa em PLA



Fig. 115 Vista do interior da maquete do tronco de pinheiro impressa em PLA

3.3. PLANO

Na experiência do conjunto de folhas, vários objetos tiveram de ser recolhidos para formar a composição desejada. Todavia, podem existir situações em que múltiplos objetos não estejam disponíveis, sendo necessário simular um conjunto a partir de um único elemento.

3.3.1. COMPOSIÇÃO DIGITAL

Esta experiência teve como fim gerar uma textura a partir da repetição de um único objeto. Foi escolhida uma pinha (Fig. 116 e Fig. 117), pela sua simplicidade formal e rigidez.



Fig. 116 Nuvem de pontos resultante da fotogrametria da pinha



Fig. 117 Amostra das fotografias utilizadas na fotogrametria da pinha

Com base no projeto da Adega Gantenbein, referido na página 20, fez-se uma simulação de queda de um grupo de pinhas dentro de uma caixa no Blender (Fig. 118). Ao reduzir o número de vértices da malha da pinha, a exigência computacional diminuiu consideravelmente.

Uma vez feito o cálculo de colisões, as malhas reduzidas dentro da caixa foram novamente substituídas pelo modelo da pinha com maior resolução. Fizeram-se vários testes de luz até encontrar um ângulo favorável para renderizar (Fig. 119).

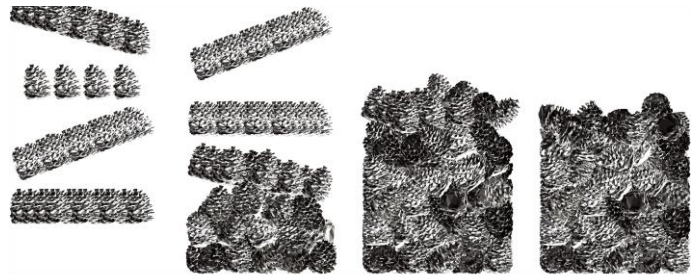


Fig. 118 Simulação de queda das pinhas dentro de uma caixa invisível

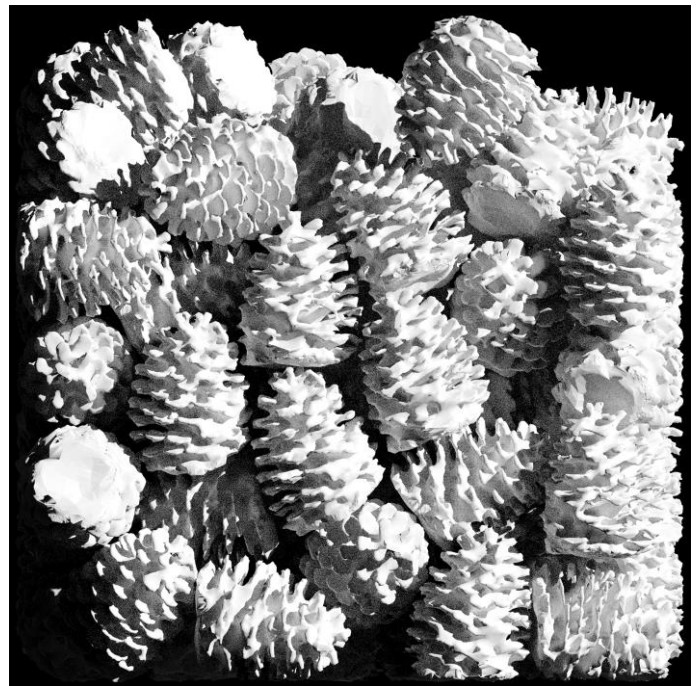


Fig. 119 Render das pinhas dentro de uma caixa invisível

Foi utilizado o Rhino Grasshopper para converter o *render* num padrão *halftone*. Este padrão consegue transmitir a escala de cinzentos apenas com pontos, variando o seu tamanho ou densidade. Esta capacidade é importante, pois as ferramentas de fabricação digital normalmente apenas têm um modo de trabalhar um material. Uma imagem binária, ou seja, com apenas dois tons, pode ser realizada com estas ferramentas, pois a ação corresponde a um tom, enquanto a não ação corresponde ao outro. O padrão *halftone* permite, por exemplo, que uma fresadora transmita a sensação de uma escala de cinzentos apenas variando o tamanho das aberturas. Imaginou-se este padrão numa fachada com painéis metálicos perfurados (Fig. 120).

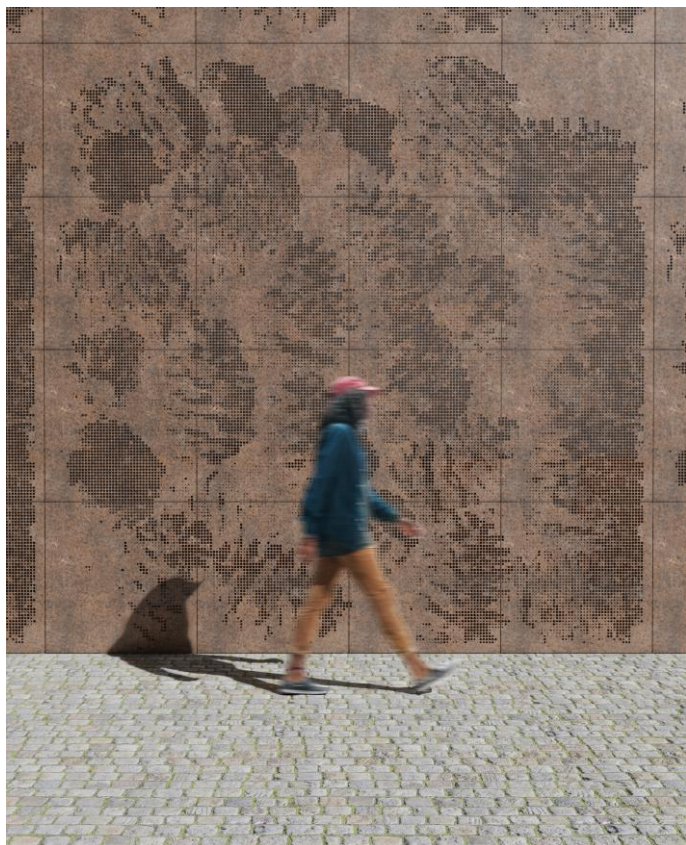


Fig. 120 Render de painéis metálicos com a imagem das pinhas numa fachada

3.3.2. TRIDIMENSIONALIDADE PLANAR

A Biblioteca da Escola Técnica de Eberswalde (Fig. 121), desenhada pelos Herzog & de Meuron, é um caso particularmente interessante por utilizar imagens como ornamentação: a fachada é composta por várias fotografias a preto e branco. A arquitetura intencionalmente neutra da biblioteca é o suporte de um programa iconográfico complexo, resultado da colaboração com o fotógrafo Thomas Ruff. Este artista de Düsseldorf utiliza a sequência de painéis em diferentes materiais para estruturar as imagens serigrafadas retiradas do diário que compõe desde 1981 a partir de recortes de jornal. O programa iconográfico foi serigrafado no vidro (Fig. 122) e moldado no betão (Fig. 123) (Fernández-Galiano, 1999, pp. 88–89).

Com base na ideia de ornamento bidimensional presente na obra dos Herzog & de Meuron, imaginaram-se os painéis com mapas de profundidade em vez de fotografias a preto e branco. Uma vez que estes transmitem a sua informação com uma escala de cinzentos, também podem gerar painéis como os da biblioteca de Eberswalde.



Fig. 121 Fachada da Biblioteca da Escola Técnica de Eberswalde, Herzog & de Meuron, 1999, Eberswalde (Janssen, 2013)

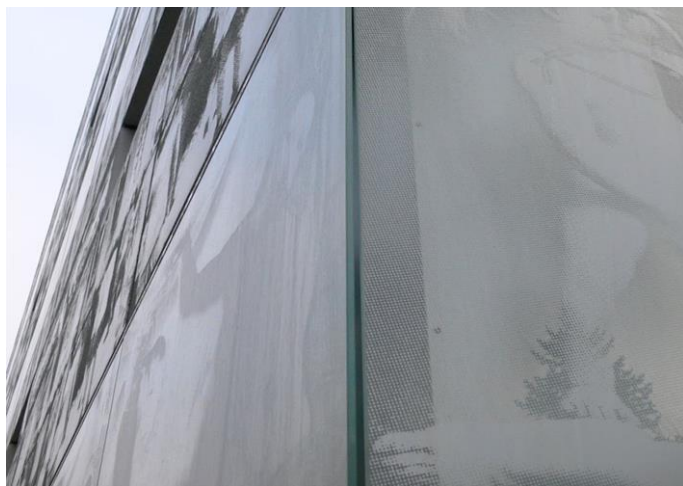


Fig. 122 Detalhe dos painéis de vidro na fachada da biblioteca (Janssen, 2013)



Fig. 123 Detalhe dos painéis de betão na fachada da biblioteca (Janssen, 2013)

Escolheu-se um crisântemo (Fig. 124 e Fig. 125) e uma rosa (Fig. 126 e Fig. 127) como objeto a capturar nesta experiência. As flores levantaram alguns desafios no processo fotogramétrico, pois tanto o programa Meshroom como o Metashape não possibilitaram o reconhecimento das faces opostas. A solução foi fazer duas fotogrametrias para cada flor, obtendo duas nuvens de pontos, uma da parte inferior e outra da parte superior, que depois foram unidas no *software* Rhino através do comando *PointCloud*.



Fig. 124 Nuvem de pontos resultante da fotogrametria do crisântemo



Fig. 125 Amostra das fotografias utilizadas na fotogrametria do crisântemo



Fig. 126 Nuvem de pontos resultante da fotogrametria da rosa

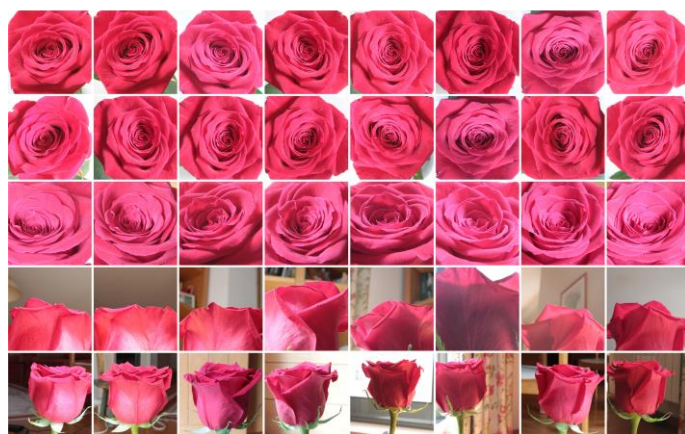


Fig. 127 Amostra das fotografias utilizadas na fotogrametria da rosa

Provou-se simular o efeito do betão na biblioteca, que representa os pretos e brancos através do acabamento da superfície – o rugoso dá a sensação da cor preta, enquanto o polido da cor branca. Utilizou-se a corrosão em vez da moldagem por se trabalhar com esferovite em vez de betão. Para o acrílico foi utilizado um processo semelhante ao vidro do projeto original, o estêncil, que utiliza o mesmo princípio da serigrafia – filtrar a tinta aplicada num objeto através de um molde bidimensional.

Primeiramente, duas placas de cartão foram recortadas com círculos de diâmetro variável com base em mapas de profundidade do crisântemo e da rosa (Fig. 128, Fig. 129 e Fig. 130). De seguida, utilizaram-se estas placas como filtros onde foi aplicada uma substância a cada material (Fig. 131).

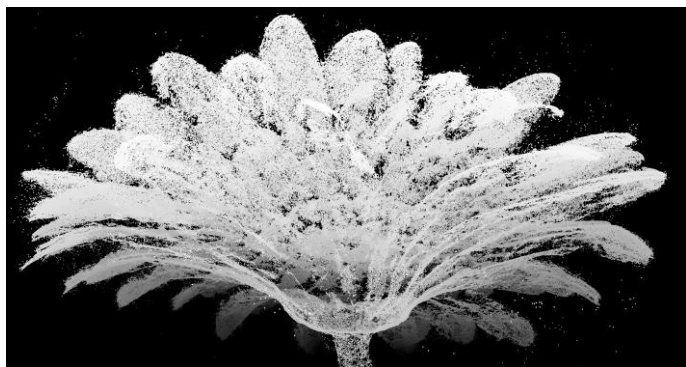


Fig. 128 Mapa de profundidade da nuvem de pontos do crisântemo



Fig. 129 Mapa de profundidade da nuvem de pontos da rosa



Fig. 130 Corte a laser de cartão prensado com base na imagem do crisântemo



Fig. 131 Processo de produção dos painéis: à esquerda, tinta em spray a ser aplicada sobre acrílico; à direita, acetona a ser borrifada em esferovite

Os painéis resultantes conseguem transmitir a forma das flores utilizadas com características diferentes. O painel de acrílico (Fig. 132) tem uma leitura fácil, pois os pontos pretos baços contrastam com o reflexo ou transparência do material. Por outro lado, o painel de esferovite (Fig. 133) é um objeto mais abstrato com uma leitura não tão evidente. O padrão da rosa é reconhecível apenas de alguns ângulos, consoante o brilho ou o sombreamento na esferovite.

Em síntese, a experiência das pinhas evidenciou a possibilidade de criar um grupo de objetos a partir de um único, formando uma composição digital. Com base no sombreamento de um grupo de pinhas numa caixa foi gerado um padrão *halftone*, que foi transformado em painéis metálicos perfurados. Posteriormente, utilizaram-se diretamente as nuvens de pontos de um crisântemo e de uma rosa para gerar mapas de profundidade, que foram também transformados num padrão *halftone*. Através da técnica estêncil, a informação foi passada para o acrílico com tinta e para a esferovite com acetona.



Fig. 132 Painel de acrílico com mapa de profundidade do crisântemo pintado



Fig. 133 Painel de esferovite com mapa de profundidade da rosa marcado

3.4. CONCLUSÃO

Os ensaios realizados nesta dissertação indicam que a fotogrametria pode ser aplicada no processo criativo em arquitetura, pois vários modelos gerados fotogrametricamente foram materializados com diversas técnicas e formas. A tabela da página seguinte resume as experiências executadas na parte prática deste trabalho.

O capítulo VOLUME serviu como uma demonstração da possibilidade de materializar um modelo gerado fotogrametricamente. A partir da digitalização de uma folha seca, foram introduzidos vários métodos de fabricação, o que levantou questões sobre as saliências do modelo 3D. Existem técnicas de moldagem e fresagem que permitem manter o detalhe das saliências, no entanto as técnicas utilizadas neste trabalho não tinham esta capacidade, o que levou à simplificação da malha – esta foi extrudida, mantendo o detalhe da folha seca apenas numa direção. Por outro lado, todas as impressoras 3D têm capacidade de materializar saliências, mas com um ângulo limite. Com esta restrição em mente, a fotogrametria da folha seca foi feita de modo a obter um modelo digital com saliências imprimíveis, limitando os ângulos de captura das fotografias. Verificou-se que o ângulo máximo de captura numa fotogrametria resulta num modelo 3D com um ângulo máximo de saliência semelhante. De seguida explorou-se o ornamento topológico volumétrico, transformando o próprio objeto capturado no volume de um edifício. Usando como referência o Metropol Parasol, foram desenvolvidas estruturas em *waffle* com base nas formas de elementos naturais.

No segundo capítulo, RELEVO, explorou-se o ornamento topológico de superfície. Foram utilizados dois conjuntos de folhas diferentes, um disposto naturalmente e outro artificialmente, que resultou numa composição natural e outra analógica, respetivamente. A dificuldade de espalhar um objeto numa superfície foi resolvida pela textura digital. Esta tem a capacidade de cobrir uma superfície com mapas, que podem conter informação tridimensional, como o mapa de profundidade e o VDM. Cada um tem as suas vantagens e desvantagens: o mapa de profundidade simplifica a forma, mas facilita a fabricação, enquanto o VDM mantém a forma, mas dificulta a fabricação. No final o relevo passou de objetivo para objeto de estudo, transformando a superfície de um tronco de pinheiro numa estrutura, com base na Mediateca de Sendai. Foi demonstrada a capacidade

de interpretar um modelo digitalizado através da parametrização.

Por último, no capítulo PLANO estudou-se a possibilidade de transmitir bidimensionalmente a informação tridimensional do objeto capturado. Um outro tipo de composição foi introduzido – a composição digital – que permite gerar um grupo de objetos a partir de um único. O sombreado de um grupo de pinhas foi representado através de orifícios com diâmetros variáveis. De seguida, procurou-se transmitir a informação tridimensional de um grupo de flores através do mapa de profundidade. Foram exploradas técnicas de fabricação com base no estêncil, pintando acrílico e corroendo esferovite. A primeira, contrariamente à segunda, resultou num objeto bastante abstrato, apenas perceptível de alguns ângulos.

Em geral, a reprodução dos elementos naturais em volume, relevo e plano foi realizada com sucesso. Tanto o volume quanto o relevo podem ser considerados como ornamento topológico de Picon, enquanto o plano pode ser inserido na categoria de textura. O padrão não foi explorado nesta dissertação, pois baseia-se na tesselação, que é altamente geométrica. Embora a natureza ofereça padrões interessantes, como a estrutura hexagonal dos favos das colmeias, a fotogrametria é desajustada para a captura dos mesmos, pois esta tecnologia prospera com a diversidade e a ausência de regras geométricas.



		OBJETO CAPTURADO	PROJETO REFERÊNCIA	MODO DE COMPOSIÇÃO	PROCESSAMENTO	ELEMENTO ARQUITETÔNICO	ESCALA	MÉTODO DE PRODUÇÃO	MATERIAL FINAL
VOLUME	1	Folha seca	N/A	Objeto único	N/A	N/A	N/A	Impressão 3D	Plástico PLA
	2							Moldagem	Gesso
	3							Fresagem	Madeira
	4							1/100	Impressão 3D
	5	Cogumelos	Metropol Parasol		1/50	Corte a laser	Cartão prensado		
RELEVO	6	Trepadeira	N/A	Composição natural	Mapa de profundidade	Painel	1/10	Moldagem	Gesso
	7	Conjunto de Folhas		Composição analógica	Modelação	Coluna	1/20	Impressão 3D	Plástico PLA
	8					Painel	1/10		
	9					Coluna	1/20		
	10					Painel	1/10		
	11					Coluna	1/20		
	12	Tronco de pinheiro		Mediateca de Sendai	Objeto único		Grasshopper	1/50	
PLANO	13	Pinha	N/A	Composição digital	Renderização	Painel	N/A	N/A	N/A
	14	Crisântemo	Biblioteca da Escola Técnica de Eberswalde	Objeto único	Mapa de profundidade		1/1	Corte a laser + estêncil	Acrílico
	15	Rosa							Esferovite

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O foco central deste trabalho foi a relação entre ornamento e arquitetura contemporânea, especialmente após um período de desornamentação no século XX. O desenvolvimento das tecnologias de fabricação digital está a reintroduzir o ornamento na arquitetura, que muitas vezes recorre à mimese. O objetivo principal foi investigar e demonstrar se a fotogrametria pode ser uma ferramenta eficaz no processo criativo em arquitetura, especificamente na incorporação de elementos ornamentais inspirados na natureza.

A análise do estado da arte revelou uma tendência significativa de complexificação na arquitetura contemporânea, impulsionada pelo desenvolvimento tecnológico, mais precisamente pelas ferramentas de fabricação digital. Contrariamente aos princípios do movimento moderno, que desvalorizavam o ornamento em prol da eficiência e padronização, a tecnologia digital emergiu como um catalisador importante para a revalorização do ornamento na arquitetura atual. No entanto, é importante reconhecer que o ornamento contemporâneo difere substancialmente do tradicional, sendo categorizado em padrão, textura e topologia por Antoine Picon. A digitalização tridimensional surge como uma ferramenta promissora para os arquitetos contemporâneos, oferecendo a oportunidade de integrar formas naturais na arquitetura e explorar a mimese como uma forma segura de ornamentação. Ao capturar a complexidade de elementos naturais, a digitalização tridimensional permite aos arquitetos explorar novas possibilidades criativas e expressivas, alinhadas com as pesquisas e aspirações da arquitetura contemporânea.

A fotogrametria foi a ferramenta escolhida para este trabalho pela sua acessibilidade e eficácia na digitalização tridimensional, especialmente na captura de elementos frágeis, sem a necessidade de toque direto. Tal como outras ferramentas, como a digitalização a laser, a vantagem da fotogrametria reside na sua capacidade de capturar objetos delicados sem danificá-los. Esta tecnologia foi inventada no século XIX para levantamento topográfico, mas recentemente tem vindo a expandir as suas aplicações em diversas áreas científicas e artísticas. O workshop Photo 3D destacou a acessibi-

lidade e facilidade de uso da fotogrametria, demonstrando como até iniciantes podem utilizá-la. Porém, para obter resultados de alta qualidade na fotogrametria, é essencial compreender e controlar os elementos fundamentais da fotografia, como o triângulo de exposição e a iluminação. Além disso, o pós-processamento é crucial para refinar os modelos digitais, removendo elementos indesejados e preparando-os para aplicações de fabricação digital.

Para demonstrar a viabilidade da utilização da fotogrametria como ferramenta criativa, foram materializados vários elementos naturais, partindo desta tecnologia. Desenvolveu-se a ideia de que a captura pode ser feita a pensar na fabricação, reduzindo a necessidade de pós-processamento. A aplicação da fotogrametria ao ornamento topológico volumétrico é limitada, pois este está muitas vezes dependente da função e da estrutura do edifício. No entanto, elementos soltos como a cobertura do Metropól Parasol ou as colunas da Mediateca de Sendai são exemplos de ornamento topológico volumétrico que a fotogrametria pode influenciar.

A textura digital revelou-se uma ferramenta indispensável na transformação de um modelo digitalizado em relevo de uma superfície. Tanto o mapa de profundidade como o mapa de deslocamento vetorial (VDM) devem ser utilizados neste processo, pois cada um tem as suas vantagens: por um lado, o mapa de profundidade retira as saliências dos modelos 3D, o que facilita a fabricação; por outro, o VDM mantém praticamente toda a informação tridimensional do objeto original, resultando num relevo mais fiel à realidade. Contrariamente ao VDM, a leitura do mapa de profundidade é relativamente fácil: preto significa distante e branco significa próximo. Esta simplicidade e clareza verifica-se na última experiência, que se baseou neste método de representação para gerar diferentes painéis.

O principal modo de expressão da arquitetura contemporânea é através do volume do edifício, ou seja, a topologia volumétrica. A fotogrametria será difícil de aplicar a este tipo de ornamento, uma vez que o objeto digitalizado não foi concebido de acordo com a função de um edifício. Esta forma de expressão muitas vezes valoriza a forma em detrimento da função. Em edifícios embutidos na malha urbana, que fazem parte de uma frente contínua, a fachada deve seguir um alinhamento com alguma rigidez. Mesmo grandes equipamentos públicos que não fazem parte da frente urbana contínua,

mas que desejam ser polivalentes, não podem ter grande liberdade volumétrica. Por outro lado, o foco no ornamento de superfície oferece uma alternativa para a arquitetura contemporânea se expressar sem desvalorizar a função do edifício, sendo a tela ideal para as formas naturais se expressarem.

O verdadeiro domínio em que as formas atingem a liberdade do crescimento vegetal não é, evidentemente, a grande arquitetura, mas o mobiliário libertado da parede. (Wölfflin, 2000, p. 180)

É neste momento escultórico, livre de qualquer restrição, que a fotogrametria alcança seu verdadeiro potencial de mimese. O fenómeno de reornamentação da arquitetura contemporânea, juntamente com o desenvolvimento das ferramentas de fabricação digital, possibilita que as formas complexas geradas pela fotogrametria se materializem.

Contrariamente a outros temas referidos nesta dissertação, como o ornamento contemporâneo, a fabricação digital e o biomorfismo, existe pouca literatura relativamente à aplicação da fotogrametria no processo criativo arquitetónico. Contudo, trata-se de uma tecnologia já bastante estudada no contexto arquitetónico em áreas como conservação de património, refletindo a sua principal utilização na atualidade. Assim, esta dissertação pode servir como base para futuras pesquisas que pretendam explorar o potencial da fotogrametria como ferramenta criativa. Este trabalho cingiu-se a elementos naturais como fonte de inspiração, o que pode ser alargado.

A fotogrametria é sem dúvida uma ferramenta acessível, contudo, para gerar resultados excelentes é necessário utilizar uma máquina fotográfica. Apesar das câmeras dos telemóveis produzirem imagens com uma resolução elevada, estas baseiam-se em processos computacionais que modificam a realidade, o que pode constituir um obstáculo para a fotogrametria que requer imagens fiéis à realidade.

Provavelmente, o futuro da digitalização tridimensional estará na digitalização a laser, uma vez que a nova gama de telemóveis da Apple e da Samsung inclui sensores que permitem este tipo de captura. Esta tecnologia combinada com a fotogrametria tem a capacidade de

gerar modelos 3D muito mais detalhados e não tão dependentes da iluminação, que é a principal condicionante da fotogrametria. É expectável que a velocidade e a facilidade do processo de digitalização, assim como a qualidade dos seus resultados, aumentarão exponencialmente nos próximos anos.

O desafio levantado no presente trabalho com o mapa de deslocamento vetorial foi apenas parcialmente resolvido. A solução encontrada não mantém a totalidade da saliência, alterando ligeiramente o modelo original. Na verdade, existem pesquisas que abordam a transformação de uma malha existente num VDM, mas os métodos oferecidos requerem um conhecimento informático profundo para serem aplicados (Stuchlík & Madaras, 2017). O interesse e a procura por esta ferramenta existem, sendo provável a sua implementação em programas de modelação 3D num futuro próximo.

Investigações futuras sobre o tema deste trabalho poderiam aprofundar técnicas avançadas de fotogrametria ou combinações com outras tecnologias para ultrapassar limitações na captura. Esta dissertação não abordou uma das vantagens mais importantes da fotogrametria em relação à digitalização a laser: a cor do objeto digitalizado. Este pode ser um tópico interessante a desenvolver, pois a cor é um tema pouco explorado tanto no ornamento contemporâneo como nos processos de fabricação digital.

Apesar de terem sido experimentadas algumas técnicas de fabricação digital, existem muitas outras que geram outros efeitos e levantam novos desafios, como braços robóticos ou máquinas curvadoras de tubos. Mesmo dentro das técnicas de fabricação exploradas, como a impressão 3D, as experiências reportadas foram feitas em plástico PLA a uma escala reduzida. Um potencial desenvolvimento desta dissertação seria aplicar o conhecimento adquirido nas maquetes a uma escala maior e com materiais mais robustos, como o betão ou o metal.

Os resultados desta pesquisa são importantes porque realçam uma mudança fundamental no discurso arquitetónico – a ornamentação, outrora rejeitada, está a reemergir como uma componente crucial do desenho, possibilitada pelos avanços nas ferramentas digitais. Através da lente da fotogrametria, foi demonstrado como os arquitetos podem aproveitar a beleza intrín-

cada da natureza e integrá-la na expressão arquitetônica. Ao realçar o potencial da fotogrametria como uma ferramenta possível na concepção arquitetônica, abrem-se caminhos para experiências e aplicações inovadoras.

Concluindo, esta investigação sublinha a viabilidade da fotogrametria ser utilizada como ferramenta criativa no contexto atual de reornamentação da arquitetura. Através de uma exploração aprofundada das suas aplicações e limitações, demonstrou-se o potencial da fotogrametria como uma ferramenta capaz de capturar e integrar elementos naturais na expressão arquitetônica. À medida que a arquitetura continua a evoluir em conjunto com os avanços tecnológicos, os conhecimentos recolhidos neste trabalho fornecem uma base sólida para futuras investigações sobre as possibilidades criativas oferecidas pela fotogrametria no desenho arquitetônico.

REFERÊNCIAS

- Adams, D. (2004). *Dennis Adams. Freeload—Fundació Mies van der Rohe* [Fotografia]. Disponível em: <https://miesbcn.com/project/dennis-adams-freeload/>
- Agkathidis, A. (2017). *Biomorphic Structures: Architecture Inspired by Nature* (2nd Revised edition). Laurence King Publishing.
- Albornoz, C., & Calatrava, S. (2018). *Santiago Calatrava: Drawing, Building, Reflecting*. Thames & Hudson.
- Almeida Costa, J., & Sampaio e Melo, A. (1996). Complexo. Em *Dicionário da Língua Portuguesa* (7.ª ed., p. 1966). Porto Editora.
- Anderson, A. (2020). *Art Nouveau Architecture*. The Crowood Press.
- astoft.com. (2001). *Grimsthorpe Castle, Lincolnshire* [Fotografia]. Disponível em: <http://www.astoft.co.uk/grimsthorpe.htm>
- Autodesk. (sem data). *Vector Displacement Maps* [VDM e render]. Obtido 15 de fevereiro de 2024, de Disponível em: https://download.autodesk.com/global/docs/softimage2013/en_us/userguide/files/GUID-21452F12-9509-4F96-BFC0-F63F8DDD6465.htm
- Baan, I. (2013). *Centro Heydar Aliyev / Zaha Hadid Architects* [Fotografia]. Disponível em: <https://www.archdaily.com.br/br/01-154169/centro-heydar-aliyev-zaha-hadid-architects>
- Bauer, V. (sem data). *Bauer's Château* [Fotografia]. Disponível em: <https://www.tugendhat.eu/en/udalost/bauer-uv-zamecek/>
- Bearth & Deplazes Architekten & Gramazio & Kohler. (2012). *Diagrama da simulação da queda das uvas* [Diagrama]. Disponível em: <https://www.archdaily.com/260612/winery-gantenbein-gramazio-kohler-bearth-deplazes-architekten>
- Bianchini, R. (2023). *East facades of the Vertical Forest towers* [Fotografia]. Disponível em: <https://www.inexhibit.com/case-studies/the-vertical-forest-towers-in-milan-by-boeri-phenomenon-or-archetype/>
- Bickel, B., Cignoni, P., Malomo, L., & Pietroni, N. (2018). State of the Art on Stylized Fabrication. *Computer Graphics Forum*, 37(6), 325–342.
- Blanc, P. (2022). *Caixa Forum, Madrid* [Fotografia]. Disponível em: <https://www.verticalgardenpatrickblanc.com/realisations/madrid/caixa-forum-madrid>
- Brazier, D. (2008). *L'Eastgate Center d'Harare, au Zimbabwe, s'inspire du principe de la termitière* [Fotografia]. Disponível em: https://www.lemonde.fr/smart-cities/article/2020/02/27/photo-mystere-3-l-eastgate-centre-d-harare-un-immeuble-en-forme-de-termitiere_6031088_4811534.html
- Bremen, J. K. (2013). *Künstliche Welten: MFO-Park in Zürich-Oerlikon* [Fotografia]. Disponível em: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:MFO-Park_in_Z%C3%BCrich-Oerlikon_%282013%29.jpg
- Brynjolfsson, E., & McAfee, A. (2014). *The Second Machine Age: Work, Progress, and Prosperity in a Time of Brilliant Technologies*. W. W. Norton & Company.
- Cabana, J. L. F. (2012). *Español: Detalle de la fachada* [Fotografia]. Disponível em: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:La_Sagrada_Familia._P%C3%B3rtico_de_la_Caridad.jpg

- CCA. (1991). *Rick Smith digitizing Frank Gehry's model of the Walt Disney Concert Hall with FaroArm, 1991* [Fotografia]. Disponível em: <https://www.cca.qc.ca/en/articles/issues/4/origins-of-the-digital/39920/a-fish-is-kind-of-aerodynamic>
- D'Arby, T. (2010). *Escultura Peix em Barcelona* [Fotografia]. Disponível em: <https://www.pexels.com/es-es/foto/arte-edificio-arquitectura-escultura-6446969/>
- de Groot, A. (2021). *The MX3D Bridge, recently installed in Amsterdam, is the world's first 3D-printed steel bridge* [Fotografia]. Disponível em: <https://www.autodesk.com/autodesk-university/blog/Amsterdams-3D-Printed-MX3D-Bridge-and-Future-Smart-Infrastructure-2021>
- De Vecchi, R. (2023). *Ceramic House / Studio RAP* [Fotografia]. Disponível em: <https://www.archdaily.com/1010548/ceramic-house-studio-rap>
- Electa Architecture. (2013). *Coluna e fachada da Mediateca de Sendai* [Fotografia]. Disponível em: <https://nalatanalata.com/journal/sendai-mediathèque-and-sendai-bookshelf/>
- EmDee. (1988). *Belgique—Bruxelles—Maison Horta (Art nouveau, architecte Victor Horta, 1898-1901)* [Fotografia]. Disponível em: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Belgique_-_Bruxelles_-_Maison_Horta_-_01.jpg
- Emden, C. (2012). *Le Corbusier Villa Shodhan, Ahmedabad* [Fotografia]. Disponível em: <https://divisare.com/projects/198358-le-corbusier-cemal-emden-villa-shodhan-ahmedabad>
- Escudero, L. de la, Gómez, A., Lopez, M. L., Murillo, J. M., Basegana, D., & Lameiro, C. M. da S. (2014). *Dicionário visual de arquitectura*. Quimera.
- Featheringhill, J. (2021). *"əvolution" Leaves* [Fotografia]. Disponível em: <http://www.yukooda.com/əvolution/>
- Feiner, R. (2012). *Winery Gantenbein / Gramazio & Kohler + Bearth & Deplazes Architekten* [Fotografia]. Disponível em: <https://www.archdaily.com/260612/winery-gantenbein-gramazio-kohler-bearth-deplazes-architekten>
- Fernández-Galiano, L. (Ed.). (1999). *Herzog & de Meuron 1980-2000* (Vol. 77). Arquitectura Viva SL.
- Filipe, J. (2017). *Geometry of Madrid Architecture* [Fotografia]. Disponível em: <https://www.archdaily.com.br/br/tag/rafael-de-la-hoz>
- Franck, D. (2011). *Metropol Parasol—J. Mayer* [Fotografia]. Disponível em: <https://jmayerh.de/metropol-parasol/>
- Garrido, N. (2013). *Centro Nacional de Convenções Qatar / Arata Isozaki* [Fotografia]. Disponível em: <https://www.archdaily.com.br/br/01-149285/centro-nacional-de-convencoes-qatar-slash-arata-isozaki>
- Goetzke, J. (2000). *Zürich Stadelhofen railway station and portal of Hirschengraben Tunnel in Zürich, Switzerland* [Fotografia]. Disponível em: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Zuerich_stadelhofen3.jpg
- Guidi, G., Remondino, F., Russo, M., Menna, F., Rizzi, A., & Ercoli, S. (2009, março 1). *Digitizing the Pompeii's Forum*. CAA 2009 Making History Interactive, Williamsburg VA.
- Gurak, W. (2010). *Beijing National Stadium* [Fotografia]. Disponível em: <https://www.flickr.com/photos/wojtekgurak/5222437448/>
- Güzelci, O. Z. (2023). *Workshop Photo 3D* [Fotografia].

- Herzog & de Meuron. (sem data). *226 National Stadium* [Fotografia]. Obtido 4 de fevereiro de 2024, de Disponível em: <https://www.herzogdemeuron.com/projects/226-national-stadium/>
- Hildner, C. (2013, março 22). Interview: Toyo Ito. *Architectural Review*. Disponível em: <https://www.architectural-review.com/essays/interview-toyo-ito>
- Hirai, H. (2010). *Nine Bridges Country Club / Shigeru Ban Architects* [Fotografia]. Disponível em: <https://www.archdaily.com/490241/nine-bridges-country-club-shigeru-ban-architects>
- Ito, T. (1995). *Sketches of the author where you can appreciate the vocation and intention to recreate a biomorphic geometry* [Esquisso]. Disponível em: <https://arquiscopio.com/archivo/2013/03/28/mediateca-de-sendai/?lang=en>
- Janssen, D. (2013). *Technical School Library, Eberswalde* [Fotografia]. Disponível em: <https://afasiaarchzine.com/2013/07/herzog-de-meuron-20/>
- Johnson, P., Kahn, L., Saarinen, E., & Rudolph Paul. (1961). *Perspecta 7: The Yale Architectural Journal*. Perspecta.
- Karlsson, U., Lundbäck, C., Norell, D., Rodhe, E., & Skeppe, V. (2021). A Live Interior: Environments, Assemblies, Materialities. *Athens Journal of Architecture*, 7(4), 463–482.
- Kelly, K. (2016). *The Inevitable: Understanding the 12 Technological Forces that Will Shape Our Future*. Viking.
- Kolarevic, B., & Klinger, K. (2013). *Manufacturing Material Effects: Rethinking Design and Making in Architecture*. Routledge.
- Lalupa. (2005). *Entablature of the Temple of Vespasian in the Roman Forum, reconstructed with original fragments in the Tabularium in Rome (Capitoline Museums)* [Fotografia]. Disponível em: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:010_218_campidoglio_Tabularium_02_a.png
- Leroi-Gourhan, A. (1964). *Le Geste et la Parole, tome 1: Technique et Langage* (Albin Michel édition). Albin Michel.
- Leroi-Gourhan, A. (1994). *Evoluzione e tecniche: Ambiente e tecniche* (L. Girola, Trad.; Vol. 2). Jaca Book.
- Loos, A. (1898). *Ladies' Fashion*. Disponível em: Ornament and Crime (S. Whiteside, Trad.). Penguin Books. (2019)
- Loos, A. (1908). *Ornament and Crime*. Disponível em: Ornament and Crime (S. Whiteside, Trad.). Penguin Books. (2019)
- Luhmann, T. (2013). *Close Range Photogrammetry: 3D Imaging Techniques* (2.^a ed.). De Gruyter.
- Lusa, A. (2024, janeiro 19). *Falta de mão de obra qualificada atinge situação limite na construção*. Observador. Disponível em: <https://observador.pt/2024/01/19/falta-de-mao-de-obra-qualificada-atinge-situacao-limite-na-construcao/>
- Lynn, G. (Ed.). (2013). *Archaeology Of The Digital*. Canadian Centre for Architecture.
- Malé-Aleman, M., & Sousa, J. P. (2005). *On Ornamentation: A Digital Perspective*. 451–457.
- Marburg, J. (2016). *Detalhe da fachada do De Young Museum* [Fotografia]. Disponível em: <https://divisare.com/projects/99558-herzog-de-meuron-duccio-malagamba-johannes-marburg-de-young-museum>

- Mathew, B. (1862). *Inflation of the balloon Intrepid to reconnoiter the Battle of Fair Oaks* [Fotografia]. Disponível em: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Inflation_of_the_balloon_Intrepid.jpg
- Mayer, J. (sem data). *Metropol Parasol, Seville—Jürgen Mayer* [Planta e corte]. Disponível em: <https://arquitecturaviva.com/works/metropol-parasol-7>
- Mayer, J. (2012). Metropol Parasol, Seville. *Architectural Design*, 82(5), 70–73.
- Norberg-Schulz, C. (1980). *Meaning in Western Architecture*. Rizzoli International Publications.
- Norman, D. (2013). *The Design of Everyday Things*. Basic Books.
- Ortiz, M. (2012). *Panoramic view of the Guggenheim Museum Bilbao taken from the right bank of the Nervion river. In the background to the right is the Iberdrola Tower. Bilbao, Basque Country, Spain*. [Fotografia]. Disponível em: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Guggenheim_Bilbao_06_2012_Panorama_2680.jpg
- Oxman, N. (2007). *Digital Craft: Fabrication-Based Design in the Age of Digital Production*.
- Pellgen, J. (2007). *Fish Dance* [Fotografia]. Disponível em: <https://www.flickr.com/photos/jpellgen/1895947502/>
- Piano, R. (1997). *The Renzo Piano Logbook* (1.^a ed.). Monacelli Press.
- Picon, A. (2013). *Ornament: The Politics of Architecture and Subjectivity*. Wiley.
- Polidori, L. (2020). On laussedat's contribution to the emergence of photogrammetry. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLIII-B2-2020, 893–899.
- Richters, C. (sem data). *Galleria Department Store Facade* [Fotografia]. Obtido 2 de fevereiro de 2024, de Disponível em: <http://www.unstudio.com/en/page/11925/galleria-department-store-facade>
- Riley, B. (1964). *Current* (Museum of Modern Art) [Emulsão sintética em placa]. Disponível em: <https://bridget-riley.publications.britishart.yale.edu/>
- RJS. (2018). *View of the plaza and its fountains* [Fotografia]. Disponível em: <https://myarchitecturalguide.wordpress.com/2018/10/01/seagram-building-mies-van-der-rohe/>
- Ruskin, J. (1840). *The Seven Lamps of Architecture*. Barnes & Noble World Digital Library.
- Ruskin, J. (1852). *Capital 36 of the Ducal Palace, Venice* (Ruskin Library, Lancaster University) [Grafite e aguarela sobre papel branco de linho]. Ruskin Foundation. Disponível em: <https://www.gallery.ca/magazine/exhibitions/john-ruskin-echoes-of-stones>
- Ruskin, J. (1900). *Modern Painters: Of Leaf Beauty. of Cloud Beauty. of Ideas of Relation*. Dana Estes & Company.
- Schulman, B. (2012). *Guild House* [Fotografia]. Disponível em: <http://retroactivefocus.com/modernism>
- Scott, G. (1914). *The Architecture of Humanism: A Study in the History of Taste*. Houghton Mifflin.
- Sennett, R. (2009). *The Craftsman* (1.^a ed.). Yale University Press.
- Shining 3D. (2022, janeiro 24). (R)evolutionary Art With 3D Scanning and 3D Printing. *EinScan*. Disponível em: <https://www.einscan.com/applications/revolutionary-art/>

- Šmídek, P. (2013). *Eberswalde Technical School Library* [Fotografia]. Disponível em: <https://www.archiweb.cz/en/b/knihovna-vysoke-skoly-trvale-udrzitelneho-rozvoje-bibliothek-der-hochschule-f-r-nachhaltige-entwicklung-eberswalde>
- Soldo, B. (2022). *Horta museum, Art Nouveau masterpiece* [Fotografia]. Disponível em: <https://capturingourdays.com/horta-museum/>
- Sönnecken, E. (sem data). *Tree-Structure Canopy* [Fotografia]. Disponível em: Agkathidis, A., & Brown, A. (2013). Tree-Structure Canopy: A Case Study in Design and Fabrication of Complex Steel Structures using Digital Tools. *International Journal of Architectural Computing*, 11(1), 87–104.
- Spuybroek, L. (2016). *The Sympathy of Things: Ruskin and the Ecology of Design* (2.^a ed.). Bloomsbury Academic.
- Staudt, W. (2008). *The Halletoren belfry on the marketplace in the city of Bruges in West Flanders* [Fotografia]. Disponível em: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Belfry_of_Brugge.jpg
- Stearns, L. (2012). *Clássicos da Arquitetura: Capela de Ronchamp / Le Corbusier* [Fotografia]. Disponível em: <https://www.archdaily.com/84988/ad-classics-ronchamp-le-corbusier>
- Stuchlik, M., & Madaras, M. (2017). *Extraction of Displacements between Mesh and Basemesh*. Disponível em: <https://www.semanticscholar.org/paper/Extraction-of-Displacements-between-Mesh-and-Stuchlik%20and-Madaras/5393a8e539a7acc77556981f90e10f2994ee877a>
- Sullivan, L. H. (1896). The tall office building artistically considered. *Lippincott's*, 403–408.
- Suresh, A. (2019). *Upper East Side, NYC* [Fotografia]. Solomon R. Guggenheim Museum. Disponível em: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Solomon_R._Guggenheim_Museum_%2848059131351%29.jpg
- Tokyorama. (2007). *Cupola di Sant'Ivo alla Sapienza* [Fotografia]. Disponível em: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cupola_Sant_Ivo.jpg
- University of Missouri. (2011). *Clássicos da Arquitetura: Wainwright Building / Louis Sullivan* [Fotografia]. Disponível em: <https://www.archdaily.com.br/br/01-115431/classicos-da-arquitetura-wainwright-building-slash-louis-sullivan>
- Venturi, R. (1977). *Complexity and Contradiction in Architecture* (2.^a ed.). Museum of Modern Art.
- Vitruvius, M. (1960). *The Ten Books on Architecture* (M. H. Morgan, Trad.). Dover Publications.
- Wang, J. (2012). *Basílica i Temple Expiatori de la Sagrada Família interiors* [Fotografia]. Disponível em: <https://www.flickr.com/photos/jiuguangw/8003066172/>
- Wölfflin, H. (2000). *Principles of Art History: The problem of the development of style in later art*. Dover Publications.
- Wright, F. L. (2005). *Frank Lloyd Wright: An Autobiography*. Pomegranate.
- Yin, J., Zhu, S., MacNaughton, P., Allen, J. G., & Spengler, J. D. (2018). Physiological and cognitive performance of exposure to biophilic indoor environment. *Building and Environment*, 132, 255–262.
- Zairon. (2018). *Deutsch: Innenhof des Te-Palasts, Mantua, Provinz Mantua, Region Lombardei, Italien* [Fotografia]. Disponível em: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Mantova_Palazzo_Te_Palasthof_2.jpg

LISTA DE IMAGENS

- Fig. 1 Planta do piso térreo da Villa Savoye, Le Corbusier, 1931, Poissy (Venturi, 1977)
- Fig. 2 Fachada frontal da Villa Shodhan, Le Corbusier, 1956, Ahmedabad (Emden, 2012)
- Fig. 3 Fachada posterior da Villa Shodhan, Le Corbusier, 1956, Ahmedabad (Emden, 2012)
- Fig. 4 Planta da Biblioteca Laurenziana, Michelangelo, 1571, Florença (Venturi, 1977)
- Fig. 5 Torre da Igreja Sant'Ivo alla Sapienza, Francesco Borromini, 1660, Roma (Tokyorama, 2007)
- Fig. 6 Exemplo de programação visual no Grasshopper
- Fig. 7 Geometria resultante da rotação e translação de um quadrado
- Fig. 8 Capiteis gregos da ordem dórica, jônica e coríntia, respetivamente (Escudero et al., 2014)
- Fig. 9 Fachada do pátio do Palazzo del Te, Giulio Romano, 1534, Mântua (Zairon, 2018)
- Fig. 10 Detalhe do corrimão na Casa Horta, Victor Horta, 1901, Bruxelas (Soldo, 2022)
- Fig. 11 Fachada da Casa Horta, Victor Horta, 1901, Bruxelas (EmDee, 1988)
- Fig. 12 Fachada do Wainwright Building, Louis Sullivan, 1891, Saint Louis (University of Missouri, 2011)
- Fig. 13 Sala principal do Bauer Château, Adolf Loos, 1925, Brun (Bauer, sem data)
- Fig. 14 Museu Guggenheim, Frank Lloyd Wright, 1939, Nova Iorque (Suresh, 2019)
- Fig. 15 Capela de Notre-Dame-du-Haut, Le Corbusier, 1955. Ronchamp (Stearns, 2012)
- Fig. 16 Perfil do pilar do Pavilhão de Barcelona, Mies van der Rohe e Lilly Reich, 1929, Barcelona (Adams, 2004)
- Fig. 17 Fachada a norte do Castelo Grimsthorpe, John Vanbrugh, 1819, Lincolnshire (astoft.com, 2001)
- Fig. 18 Campanário de Bruges, 1240, Bruges (Staudt, 2008)
- Fig. 19 Praça e banco em frente ao Seagram Building, Mies van der Rohe e Philip Johnson, 1958, Nova Iorque (RJS, 2018)
- Fig. 20 Entrada da Guild House, Robert Venturi, 1963, Filadélfia (Schulman, 2012)
- Fig. 21 Inauguração da Ponte MX3D, MX3D, 2021, Amsterdão (de Groot, 2021)
- Fig. 22 Adega Gantenbein, Gramazio & Kohler e Bearth & Deplazes Architekten, 2006, Suíça (Feiner, 2012)
- Fig. 23 Detalhe dos painéis da fachada do De Young Museum, Herzog & de Meuron, 2005, São Francisco (Marburg, 2016)
- Fig. 24 *Current*, Bridget Riley, 1964 (Riley, 1964)
- Fig. 25 Fachada que muda de cor da Galleria Department Store, UNStudio, 2004, Seul (Richters, sem data)
- Fig. 26 Fachada do Museu ABC, Aranguren & Gallegos Architects, 2010, Madrid (Filipe, 2017)
- Fig. 27 Richard Gilder Center, Studio Gang, 2023, Nova Iorque
- Fig. 28 Casa Cerâmica, Studio RAP, 2023, Amsterdão (De Vecchi, 2023)
- Fig. 29 Centro Heydar Aliyev, Zaha Hadid Architects, 2013, Baku (Baan, 2013)

- Fig. 30 Biblioteca da Escola Técnica de Eberswalde, Herzog & de Meuron, 1999, Eberswalde (Šmídek, 2013)
- Fig. 31 Museu Guggenheim de Bilbao, Gehry Partners, 1997, Bilbao (Ortiz, 2012)
- Fig. 32 Adega Gantenbein, Gramazio & Kohler e Bearth & Deplazes Architekten, 2006, Suíça (Feiner, 2012)
- Fig. 33 Simulação digital da queda de uvas dentro de uma caixa (Bearth & Deplazes Architekten & Gramazio & Kohler, 2012)
- Fig. 34 Estádio Nacional de Pequim, Herzog & de Meuron, 2008, Pequim (Gurak, 2010)
- Fig. 35 Maquete de estudo para o Estádio Nacional de Pequim (Herzog & de Meuron, sem data)
- Fig. 36 Espirais geométricas: à esquerda, uma espiral logarítmica; à direita, uma espiral de ouro
- Fig. 37 CaixaForum Madrid, Herzog & de Meuron, 2008, Madrid (Blanc, 2022)
- Fig. 38 Parque MFO, Burckhardt & Partners, 2002, Zurique (Bremen, 2013)
- Fig. 39 Bosco Verticale, Boeri Studio, 2014, Milão (Bianchini, 2023)
- Fig. 40 Eastgate Center, Mick Pearce, 1996, Harare (Brazier, 2008)
- Fig. 41 Cornija do Templo de Vespasiano e Tito, 79 a.c., Roma (Lalupa, 2005)
- Fig. 42 Desenho de um capitel do Palácio Ducal, 1424, Veneza (Ruskin, 1852)
- Fig. 43 Interior da Sagrada Família, Antoni Gaudí, 1882-presente, Barcelona (Wang, 2012)
- Fig. 44 Pórtico da Caridade na Sagrada Família (Cabana, 2012)
- Fig. 45 Estação Stadelhofen, Santiago Calatrava, 1990, Zurique (Goetzke, 2000)
- Fig. 46 Desenhos de Calatrava para a estação (Albornoz & Calatrava, 2018, pp. 46–47)
- Fig. 47 *Peix*, Frank Gehry, 1992, Barcelona (D'Arby, 2010)
- Fig. 48 Escultura em frente ao restaurante Fish Dance, Frank Gehry, 1987, Kobe (Pellgen, 2007)
- Fig. 49 Tree-Structure Canopy em frente ao WestendGate, Just Burgeff architekten e a3lab, 2010, Frankfurt (Sönnecken, sem data)
- Fig. 50 Nine Bridges Country Club, Shigeru Ban Architects, 2009, Coreia do Sul (Hirai, 2010)
- Fig. 51 Esquema do processo de transformação de um objeto real numa malha digital
- Fig. 52 Rick Smith a digitalizar a maquete do Walt Disney Concert Hall com um FaroArm (CCA, 1991)
- Fig. 53 Corte de um modelo resultante de uma digitalização tridimensional (Karlsson et al., 2021, p. 465)
- Fig. 54 *evolution*, Yuko Oda, 2021 (Featheringhill, 2021)
- Fig. 55 Processo de digitalização a laser e modelo impresso em resina de uma folha seca para a escultura *evolution*, Yuko Oda, 2021 (Shining 3D, 2022)
- Fig. 56 Esquema da triangulação no processo fotogramétrico
- Fig. 57 Esquema do processo fotogramétrico manual e digital
- Fig. 58 Primeiras experiências de fotografias aéreas com balões de ar quente (Mathew, 1862)
- Fig. 59 Nuvem de pontos do Fórum de Pompeia (Guidi et al., 2009)
- Fig. 60 Modelos 3D de detalhes ornamentais do Fórum de Pompeia (Guidi et al., 2009)

Fig. 61	Apresentação do workshop (Güzelci, 2023)	Fig. 77	Modelo da folha seca fatiado no UltiMaker Cura
Fig. 62	Digitalização no jardim do Pavilhão Carlos Ramos (Güzelci, 2023)	Fig. 78	Processo de impressão
Fig. 63	Processamento das fotografias nos computadores (Güzelci, 2023)	Fig. 79	Folha seca impressa em plástico PLA
Fig. 64	Fotogrametrias realizadas pelos participantes do workshop	Fig. 80	Molde da folha seca em plástico PLA contendo gesso líquido
Fig. 65	Gráficos referentes ao formulário do workshop	Fig. 81	Folha seca em gesso após ser removida do molde
Fig. 66	Esquema de captura em órbita	Fig. 82	Fresagem da folha seca no FabLab Lisboa
Fig. 67	Esquema de captura em percurso	Fig. 83	Folha seca fresada em madeira
Fig. 68	Iluminação do objeto capturado: à esquerda, luz natural; à direita, luz artificial	Fig. 84	Cobertura do Metropol Parasol, Jürgen Mayer H. Architects, 2011, Sevilha (Franck, 2011)
Fig. 69	Fotogrametria com baixa resolução: à esquerda, fotos distantes do objeto; à direita, a nuvem de pontos indefinida resultante	Fig. 85	Planta e alçado do Metropol Parasol (Mayer, sem data)
Fig. 70	Fotogrametria com elevada resolução: à esquerda, fotos próximas do objeto; à direita, a nuvem de pontos detalhada resultante	Fig. 86	Renders da cobertura com a forma da folha seca
Fig. 71	Processo de remoção do chão da malha no Blender	Fig. 87	Fotografia da estrutura em <i>waffle</i> da folha seca impressa em plástico PLA
Fig. 72	Centro Nacional de Convenções do Catar, Arata Isozaki, 2011, Doha (Garrido, 2013)	Fig. 88	Nuvem de pontos do conjunto de cogumelos
Fig. 73	Nuvem de pontos resultante da fotogrametria da folha seca	Fig. 89	Esquema de encaixes da estrutura em <i>waffle</i>
Fig. 74	Amostra das fotografias utilizadas na fotogrametria da folha seca	Fig. 90	<i>Nesting</i> das peças dos cogumelos
Fig. 75	Esquema de ângulo máximo de impressão numa impressora 3D	Fig. 91	Processo de montagem
Fig. 76	Esquema da relação entre a captura e saliências do modelo: à esquerda, um ângulo de captura superior resultou em saliências acentuadas; à direita, um ângulo inferior minimizou as mesmas	Fig. 92	Maquete de cogumelos em cartão prensado
		Fig. 93	Coluna com negativo de várias folhas secas
		Fig. 94	Nuvem de pontos resultante da fotogrametria da hera
		Fig. 95	Amostra das fotografias utilizadas na fotogrametria da hera
		Fig. 96	Mapa de profundidade do modelo 3D da hera
		Fig. 97	Mapa de profundidade recortado

- Fig. 98 Textura resultante mapeada em 4 quadrados: no canto superior direito, um mapa de normais; nos restantes quadrantes, um mapa de profundidade sem descontinuidades
- Fig. 99 Maquetes resultantes da utilização do mapa de profundidade do grupo de folhas: à esquerda, um painel de gesso; à direita, uma coluna impressa em PLA
- Fig. 100 Nuvem de pontos resultante da fotogrametria do grupo de folhas
- Fig. 101 Amostra das fotografias utilizadas na fotogrametria do grupo de folhas
- Fig. 102 Saliências dos modelos 3D: à esquerda, uma malha modificada pelo mapa de profundidade; à direita, o modelo original
- Fig. 103 Maquetes resultantes da disposição manual do grupo de folhas: à esquerda, um painel impresso em PLA; à direita, uma coluna impressa em PLA
- Fig. 104 Mapa de deslocamento vetorial: à esquerda, o sistema de cores utilizado no plano XY para indicar o deslocamento de cada vértice (imagem do autor); à direita, um VDM de uma orelha e o modelo 3D resultante (Autodesk, sem data)
- Fig. 105 Processo de adaptação de uma malha plana ao relevo do grupo de folhas
- Fig. 106 Mapa de deslocamento vetorial do grupo de folhas
- Fig. 107 Textura do mapa de deslocamento vetorial do grupo de folhas
- Fig. 108 Maquetes resultantes da utilização do VDM do grupo de folhas: à esquerda, um painel impresso em PLA; à direita, uma coluna impressa em PLA
- Fig. 109 Mediateca de Sendai, Toyo Ito, 2001, Sendai (Electa Architecture, 2013)
- Fig. 111 Nuvem de pontos resultante da fotogrametria do tronco de pinheiro
- Fig. 112 Amostra das fotografias utilizadas na fotogrametria do tronco de pinheiro
- Fig. 113 Esquema do processamento do tronco de pinheiro
- Fig. 114 Vista lateral da maquete do tronco de pinheiro impressa em PLA
- Fig. 115 Vista do interior da maquete do tronco de pinheiro impressa em PLA
- Fig. 116 Nuvem de pontos resultante da fotogrametria da pinha
- Fig. 117 Amostra das fotografias utilizadas na fotogrametria da pinha
- Fig. 118 Simulação de queda das pinhas
- Fig. 119 *Render* das pinhas dentro de uma caixa invisível
- Fig. 120 *Render* de painéis metálicos com a imagem das pinhas numa fachada
- Fig. 121 Fachada da Biblioteca da Escola Técnica de Eberswalde, Herzog & de Meuron, 1999, Eberswalde (Janssen, 2013)
- Fig. 122 Detalhe dos painéis de vidro na fachada da biblioteca (Janssen, 2013)
- Fig. 123 Detalhe dos painéis de betão na fachada da biblioteca (Janssen, 2013)
- Fig. 124 Nuvem de pontos resultante da fotogrametria do crisântemo
- Fig. 125 Amostra das fotografias utilizadas na fotogrametria do crisântemo
- Fig. 126 Nuvem de pontos resultante da fotogrametria da rosa
- Fig. 127 Amostra das fotografias utilizadas na fotogrametria da rosa

Fig. 129 Mapa de profundidade da nuvem de pontos da rosa

Fig. 130 Corte a laser de cartão prensado com base na imagem do crisântemo

Fig. 131 Processo de produção dos painéis: à esquerda, tinta em spray a ser aplicada sobre acrílico; à direita, acetona a ser borrifada em esferovite

Fig. 132 Painel de acrílico com mapa de profundidade do crisântemo pintado

Fig. 133 Painel de esferovite com mapa de profundidade da rosa marcado

Fotogrametria e Arquitetura

Francisco Scotti Campos Belo Afonso

FACULDADE DE ARQUITETURA

