

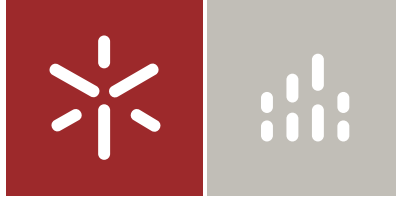


João Pedro Oliveira Moreira

Fabrico Aditivo Cerâmico em Arquitectura:
Metodologia Computacional para Definição
de um Sistema de Colunas

Universidade do Minho
Escola de Arquitectura





Universidade do Minho
Escola de Arquitectura

João Pedro Oliveira Moreira

Fabrico Aditivo Cerâmico em Arquitectura: Metodologia Computacional para Definição de um Sistema de Colunas

Dissertação de Mestrado
Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao
Grau de Mestre em Arquitectura
Área de Construção e Tecnologia

Trabalho efetuado sob a orientação do
Professor Doutor Bruno Acácio Ferreira Figueiredo
Professor Doutor Paulo Jorge Sousa Cruz

Declaração

Nome. João Pedro Oliveira Moreira

Endereço eletrónico. joao_pedro_moreira3@outlook.com

Telefone. 917916732

Bilhete de identidade / cartão de cidadão. 14764676

Título da dissertação. Fabrico Aditivo Cerâmico em Arquitetura:
Metodologia Computacional para Definição de um Sistema de Colunas

Equipa de orientação.

Professor Doutor Bruno Acácio Ferreira Figueiredo
Professor Doutor Paulo Jorge Sousa Cruz

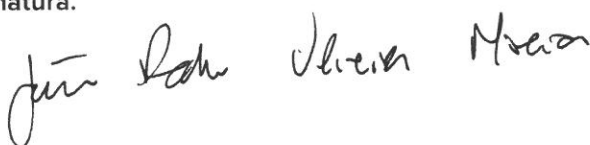
Ano de conclusão. 2018

Mestrado em Arquitetura

É AUTORIZADA A REPRODUÇÃO INTEGRAL DESTA DISSERTAÇÃO
APENAS PARA EFEITOS DE INVESTIGAÇÃO, MEDIANTE DECLARAÇÃO
ESCRITA DO INTERESSADO, QUE A TAL SE COMPROMETE.

Universidade do Minho, 29 de Outubro de 2018

Assinatura.



Agradecimentos

Ao professor Bruno Figueiredo e ao professor Paulo Cruz, um agradecimento especial por terem aceite este desafio e por durante todo o percurso desta investigação se mostrarem disponíveis e entusiasmados para me orientar.

À Tatiana e ao Luís, pela vossa amizade, pelo vosso apoio e por todos os momentos de boa disposição e alegria passados no decorrer deste ano.

Ao Carvalho e ao Samuel, pela amizade, entusiasmo e apoio técnico ao longo desta investigação.

À Daniela, pelo apoio incondicional e por mostrar sempre um entusiasmo fora do normal, mesmo quando eu o perdia. E por durante meses me ouvir falar sobre código computacional e impressão 3D.

Aos meus pais por todo apoio, afeto e compreensão de sempre.

Obrigado.

Resumo

Nos dias de hoje não vemos apenas o processo de desenho em arquitetura mediado por ferramentas digitais, assistimos cada vez mais à experimentação e disseminação deste tipo de recursos em todos os estágios da construção, desde a concepção até à manufatura. Neste contexto, a associação de material cerâmico a fabrico aditivo representa, para a arquitetura, uma ampliação daquilo que é possível explorar através deste método e assim, devido às características do material, cria-se a possibilidade de explorar novas ideias e conceitos.

O uso combinado de desenho computacional e fabrico digital em arquitetura apresenta um enorme potencial para melhorar e introduzir inovações ao desenho arquitetónico e ao ambiente construído. A associação destas ferramentas, permite não só explorar a produção em série de elementos singulares e personalizáveis, expandindo as potencialidades das técnicas tradicionais, mas também analisar determinados pressupostos, e com base neles, identificar a solução que melhor consegue atender a uma situação específica.

A presente investigação procura avaliar a integração destas ferramentas digitais em arquitetura, incidindo especificamente sobre questões relacionadas com a produção de elementos estruturais personalizados, que se definem através de relações paramétricas de inspiração biomórfica, com recurso a fabrico aditivo cerâmico.

Neste sentido, o caso de estudo procura desenvolver um sistema de componentes estruturais — um sistema de colunas — reticulados, personalizados e otimizados, com base em pressupostos definidos previamente. O processo de definição deste sistema é mediado por desenho computacional, implementando não só estratégias de análise e otimização estrutural, mas também características formais miméticas da natureza, criando um modelo que adapta os seus atributos formais, consoante os seus pressupostos e as restrições do material, resultando na definição de um conjunto de soluções que respondem ao problema de projeto proposto.

Palavras-Chave. Fabrico Aditivo; Cerâmica 3D; Desenho Computacional; Otimização Estrutural; Biomorfismo.

Abstract

Nowadays, we not only see the design process in architecture mediated by digital tools, we also are increasingly witnessing the experimentation and dissemination of this type of resources at every stage of construction, from design to manufacturing. In this context, the association of ceramic material to additive manufacturing represents, for architecture, an extension of what can be exploited through this method, and thus, due to the characteristics of the material, it is possible to explore new ideas and concepts.

The combined use of computational design and digital manufacturing in architecture presents an enormous potential to improve and introduce innovations in architectural design and the built environment. The association of these tools allows not only to explore the concept of standardized production of unique and customizable elements, expanding the potential of traditional techniques, but also allows an analysis of certain assumptions and, based on them, identify the solution that can best meet a specific situation.

The present research aims to evaluate the integration of these digital tools in architecture, focusing specifically on issues related to the production of customized structural elements, which are defined through parametric relationships of biomorphic inspiration, using additive ceramic manufacturing.

In this sense, the case study seeks to develop a system of reticulated, customized and optimized structural components, — a column system — based on previously defined assumptions. The process of defining this system is mediated by computational design, implementing not only structural and optimization analysis strategies, but also mimetic formal features of nature, creating a model that adapts its formal attributes, depending on its assumptions and the material constraints, resulting in the definition of a set of solutions that respond to the proposed design problem.

Keywords. Additive Manufacturing; Ceramic 3D; Computational Design; Structural Optimization; Biomorphism

Índice

1.	Introdução	001
1.1.	Objetivos e Considerações Gerais	003
1.2.	Organização de Tese	005
2.	Enquadramento	007
2.1.	Fabrico Aditivo e Desenho Estrutural	009
2.2.	Cerâmica 3D e Arquitetura	013
2.3.	Desenho Computacional e Arquitetura	019
2.4.	Coluna e Arquitetura	023
3.	Definição do Sistema de Colunas	029
3.1.	Diagrama de <i>Voronoi</i>	031
3.2.	Grelhas Regulares	035
3.3.	Interligação de Pontos	039
3.4.	Subsuperfície Recursiva e Suavização de Curvas	043
3.5.	Complexidade e Biomorfismo	047
3.6.	Análise Estrutural	051
3.7.	Otimização Estrutural	055
3.8.	Definição de Protótipo a Produzir	059
4.	Produção do Protótipo	063
4.1.	Tradução do Modelo Digital para Físico	065
4.2.	Testes Prévios e Problemas	067
4.3.	Otimização do Processo de Fabrico	071
4.4.	Preparação do Protótipo Final	077
4.4.1	Fabrico em Partes e Através de Ligações Internas	079
4.4.2.	Encaixes	089
4.4.3.	Fabrico Através de Produção Contínua	093
4.5.	Análise dos Protótipos Finais	095
5.	Conclusão	099
5.1.	Considerações Finais e Trabalhos Futuros	101
6.	Bibliografia	103
7.	Anexos	109

Índice de figuras

Figura 2.1.a. - Esquema tridimensional da produção de uma casa, através de fabrico aditivo em betão, Contour Crafting. Retirado de contourcrafting.com.

Figura 2.1.b. - Impressão de parte de uma parede curva, através de fabrico aditivo em betão, recorrendo a um braço robótico, CyBe Industries. Retirado de cybe.eu.

Figura 2.1.c. - Um dos primeiros testes de impressão, recorrendo à família de pequenos robots, Institute for Advanced Architecture of Catalonia, 2015. Retirado de iaac.net.

Figura 2.1.d. e 2.1.e. - Impressora de SLS (Selective Laser Sentering), usada para fabrico aditivo de componentes estruturais e Radiolaria Pavilion, D-Shape, 2008. Retirado de d-shape.com.

Figura 2.1.f. - Fabrico de um componente estrutural de uma casa, Winsun3D, 2014. Retirado de winsun3d.com.

Figura 2.1.g. - Sistema de lajes construído através de fabrico aditivo em betão, Block Research Group, 2016. Retirado de block.arch.ethz.ch.

Figura 2.1.h. e 2.1.i. - Fabrico de coluna através de uma extrusão suportada, Amalgamma, 2016. Retirado de amalgamma.org.

Figura 2.1.j. - Coluna em treliça, construída através de fabrico aditivo em betão, XtreeE, 2017. Retirado de xtreee.eu.

Figura 2.2.a. - Polybrick, Sabin Desing Lab, 2014. Retirado de jennysabin.com.

Figura 2.2.b. - Building Bytes, Brian Peters, 2012. Retirado de dezeen.com.

Figura 2.2.c. - Cool Brick, Emerging Objects, 2015. Retirado de emergingobjects.com.

Figura 2.2.d. - Testes com diferentes amplitudes, Figueiredo *et al*, 2017.

Figura 2.2.e. - Wave Wall, Advanced Ceramics R&D Lab, 2017. Retirado de aclab-idegui.org.

Figura 2.2.f. - Odin Wall, Advanced Ceramics R&D Lab, 2017. Retirado de aclab-idegui.org.

Figura 2.2.g. - Hexashade, Advanced Ceramics R&D Lab, 2018. Retirado de aclab-idegui.org.

Figura 2.3.a. - H2O Expo Pavilion, Nox Architects, 1997. Retirado de nox-art-architecture.com.

Figura 2.3.b. - Museu Guggenheim, Bilbao, Frank Gehry, 1997. Retirado de spanishcontemporaryart.gallery.

Figura 2.3.c. - Cobertura do átrio principal do Museu Britânico, Foster & Partners, 2000. Retirado de fosterandpartners.com.

Figura 2.3.d. - Museu Soumaya, Fernando Romero, 2011. Retirado de fr-ee.org.

Figura 2.3.e. - Aeroporto Internacional Shenzhen Bao'an, Studio Fuksas, 2013. Retirado de fuksas.com.

Figura 2.3.f. - Ponte pedonal, Madrid, Institute for Advanced Architecture of Catalonia e D-Shape, 2016. Retirado de iaac.net.

Figura 2.4.a. - Partenon, Grécia, como exemplo da ordem Dórica. Retirado de pexels.com.

Figura 2.4.b. - Erecteion, Grécia, como exemplo da ordem Jónica. Retirado de flickr.com.

Figura 2.4.c. - Templo de Zeus, Grécia, como exemplo da ordem Coríntia. Retirado de wordpress.com.

Figura 2.4.d. - Praça de S. Pedro, Cidade do Vaticano, como exemplo da ordem Toscana. Retirado de thoughtco.com.

Figura 2.4.e. - Capitel da Basílica da Estrela, Lisboa, como exemplo da ordem Compósita. Retirado de redbubble.com.

Figura 2.4.f. - Estudos da coluna de Antoni Gaudí, Carlos Barrios. Retirado de flickr.com.

Figura 2.4.g. - Montagem de coluna, baseada na obra de Hestnes Ferreira, através e braço robótico, José Sousa, 2016. Retirado de Building Traditions with Digital Research - Reviewing the Brick Architecture of Raúl Hestnes Ferreira through Robotic Fabrication, Sousa, 2016.

Figura 3.1.a. - Testes com diferentes amplitudes, Retirado de "Ceramic 3D Printing – The Future of Brick Architecture", Figueiredo *et al*, 2017.

Figura 3.1.b. - Código que define desenho do sistema.

Figura 3.1.c. - Esquema evolutivo do desenho: a. forma inicial, b. população aleatória de pontos e c. geração de células, onde a traço vermelho se observam amplitudes superiores a 30°.

Figura 3.1.d. - Coluna impressa - Fotografia do protótipo.

Figura 3.2.a. - Esquema demonstrando a amplitude obtida com o uso das grelhas estruturais triangulares e hexagonais.

Figura 3.2.b. - Código que define desenho do sistema.

Figura 3.2.c. - Esquema evolutivo do desenho: a. forma inicial, b. população regular de pontos e c. geração de células, onde a traço vermelho se observam amplitudes superiores a 30°.

Figura 3.2.d. - Coluna impressa - Fotografia do protótipo.

Figura 3.3.a. - Esquema exemplificando o aumento das amplitudes com base no aumento das divisões verticais.

Figura 3.3.b. - Código que define desenho do sistema.

Figura 3.3.c. - Esquema evolutivo do desenho: a. forma inicial, b. definição manual de pontos, c. definição do percurso da linha, d. geração da grelha estrutural e e. suavização de curvas.

Figura 3.3.d. - Coluna impressa - Fotografia do protótipo.

Figura 3.4.a. - Esquema mostrando o desenho do padrão introduzido na grelha estrutural reticulada.

Figura 3.4.b. - Código que define desenho do sistema.

Figura 3.4.c. - Esquema evolutivo do desenho: a. forma inicial, b. divisão da superfície geral em subsuperfícies, c. definição do padrão, marcado a traço vermelho, d. repetição do padrão por todas as subsuperfícies e e. suavização de curvas.

Figura 3.4.d. - Coluna impressa - Fotografia do protótipo.

Figura 3.5.a. - Fotografia do tronco de uma planta Ficus,

Figura 3.5.b. - Código que define desenho do sistema.

Figura 3.5.c. - Esquema evolutivo do desenho: a. grelha estrutural reticulada base, b. variação da secção ao longo da sua altura e c. rotação individual das secções.

Figura 3.5.d. - Coluna impressa - Fotografia do protótipo.

Figura 3.6.a. - Componentes do plug-in Karamba3D®, que definem o processo de análise estrutural.

Figura 3.6.b. - Conversão do objeto tridimensional para desenho vectorial, identificando a grelha reticulada, os pontos de suporte e descarga.

Figura 3.6.c. - Gráfico de análise do esforço axial da coluna.

Figura 3.6.d. - Gráfico de análise da deformação axial da coluna.

Figura 3.7.a. - Componentes do plug-in Octopus®, que definem otimização estrutural.

Figura 3.7.b. - Gráfico de nuvem de pontos, mostrando as várias soluções analisadas, proveniente do software Octopus®.

Figura 3.7.c. - Solução A impressa - Fotografia do protótipo.

Figura 3.7.d. - Solução B impressa - Fotografia do protótipo.

Figura 3.7.e. - Solução C impressa - Fotografia do protótipo.

Figura 3.8.a. - Solução A - Gráficos de análise do esforço e deformação axial e dados base da coluna.

Figura 3.8.b. - Solução B - Gráficos de análise do esforço e deformação axial e dados base da coluna.

Figura 3.8.c. - Solução C - Gráficos de análise do esforço e deformação axial e dados base da coluna.

Figura 4.1.a. - Componentes do plug-in XYLinus, que definem a conversão para g-code.

Figura 4.1.b. - Desenho vectorial das três peças consideradas para os testes prévios.

Figura 4.1.c. - Impressora Lutum 2.0 - Fotografia do local de trabalho.

Figura 4.2.a. - Teste 1 - Impressão 1.

Figura 4.2.b. - Teste 1 - Impressão 2.

Figura 4.2.c. - Teste 1 - Impressão 3.

Figura 4.3.a. - Esquema vectorial do otimização introduzida.

Figura 4.3.b. - Teste 2 - Subida em Z 3mm - Impressão 1.

Figura 4.3.c. - Teste 2 - Subida em Z 3mm - Impressão 2.

Figura 4.3.d. - Teste 2 - Subida em Z 3mm - Impressão 3.

Figura 4.3.e. - Comparação do antes (acima) e depois (abaixo) da otimização.

Figura 4.3.f. - Teste 3 - Subida em Z 5mm - Impressão 1.

Figura 4.3.g. - Teste 3 - Subida em Z 5mm - Impressão 2.

Figura 4.3.h. - Teste 3 - Subida em Z 5mm - Impressão 3.

Figura 4.3.i. - Primeiro teste de montagem das peças.

Figura 4.4.a. - Código que define o processo de divisão da coluna em partes.

Figura 4.4.b. - Desenho vectorial das três partes que constroem a coluna.

Figura 4.4.c. - Desenho vectorial da coluna completa.

Figura 4.4.1.a. - Esquema da metodologia aplicada nas compensações.

Figura 4.4.1.b. - Teste sem compensação - Peça 1.

Figura 4.4.1.c. - Teste sem compensação - Peça 2.

Figura 4.4.1.d. - Teste de montagem - Sem compensação.

Figura 4.4.1.e. - Teste sem compensação - Peça 2.

Figura 4.4.1.f. - Teste sem compensação - Peça 3.

Figura 4.4.1.g. - Teste de montagem - Sem compensação.

Figura 4.4.1.h. - Análise dos índices de retração das peças 1 e 2, onde a vermelho está representado o modelo digital e a branco o modelo impresso. À esquerda, vista lateral e à direita, vista de topo.

Figura 4.4.1.i. - Análise dos índices de retração das peças 2 e 3, onde a vermelho está representado o modelo digital e a branco o modelo impresso. À esquerda, vista de topo e à direita, vista lateral.

Figura 4.4.1.j. - Teste de compensação de 6,5mm - Peça 1.

Figura 4.4.1.l. - Teste de compensação de 6,5mm - Peça 2.

Figura 4.4.1.m. - Teste de montagem - Compensação 6,5mm.

Figura 4.4.1.n. - Teste de compensação de 11,6mm - Peça 2.

Figura 4.4.1.o. - Teste de compensação de 11,6mm - Peça 3.

Figura 4.4.1.p. - Teste de montagem - Compensação 11,6mm.

Figura 4.4.2.a. - Esquema tipo de encaixe macho/fêmea.

Figura 4.4.1.b. - Esquema expondo a impossibilidade de impressão devido à falta de suporte numa parte do objeto.

Figura 4.4.2.c. - Encaixe A - Fotografia do objeto.

Figura 4.4.2.d. - Encaixe B - Fotografia do objeto.

Figura 4.4.2.e. - Esquema de montagem com encaixes - Fotografia do protótipo.

Figura 4.4.3.a. - Coluna impressa - Fotografia do protótipo - e análise do índice de retração da peça, onde a vermelho está representado o modelo digital e a branco o modelo impresso.

Figura 4.5.a. - Comparação e análise da retração das alturas da coluna impressa em partes (à esquerda) e contínua (à direita), com base na dimensão do desenho digital (traço vermelho).

Lista de siglas

ACLab. Advanced Ceramics R&D Lab

CAM. Computer Aided Manufacturing (fabrico assistido por computador)

CATIA. Computer Aided Three-dimensional Interactive Application

CNC. Computer Numeric Control (controlo numérico computadorizado)

FFF. Fused Filamente Fabrication

IAAC. Institute for Advanced Architecture of Catalonia

LDM. Liquid Deposition Manufacturing

SLS. Selective Laser Sintering

1. Introdução

Diferentes tipos de entidades — instituições académicas, investigadores, construtores, arquitetos, engenheiros, empresas de software e hardware — nas últimas duas décadas, tem concentrado os seus esforços no uso de técnicas de fabrico aditivo em arquitetura. Este facto resulta na proposta e no desenvolvimento de um amplo conjunto de métodos (Kolarevic, 2003). Cada um deles apresenta novas potencialidades, sejam elas novas possibilidades formais, novas capacidades de materiais ou mudanças no processo de fabricação. Os resultados dessas investigações representam o avanço da tecnologia e do que pode ser alcançado. No entanto, existe um longo percurso até que estas tecnologias se apliquem de modo continuado em contexto real, por isso ainda há espaço para que estas técnicas emergentes evoluam. A presente investigação tem como objetivo contribuir para o desenvolvimento de conhecimento nesta área, mais especificamente a utilização da tecnologia de fabrico aditivo de material cerâmico em arquitetura.

Esta investigação trabalha principalmente com temas de fabrico aditivo cerâmico e fabrico de componentes estruturais, no entanto para os desenvolver interliga-se com outros temas igualmente importantes. Nomeadamente, a integração de desenho computacional, otimização estrutural e biomorfismo para a definição dos componentes estruturais. Pretende-se assim, desenvolver um sistema de colunas, que atue como ferramenta auxiliar de projeto, que integre o desenho dos respetivos componentes estruturais, de acordo com certas condições iniciais, para depois o produzir com recurso a fabrico aditivo em material cerâmico.

Com este propósito propõe-se o recurso a modelos computacionais para a integração e controlo de um conjunto de parâmetros — biomórficos e estruturais — que se pretendam estar na origem da definição do sistema de colunas. Posteriormente, já com o desenho da coluna definido, procura-se trabalhar a otimização estrutural do protótipo assim como o código de impressão e máquina.

1.1. Objetivos e Considerações Gerais

Nos últimos anos verifica-se um interesse crescente por questões relacionadas com fabrico digital e existe, com este crescimento, uma ideia de indústria 3.0 e indústria 4.0, que favorece a disseminação deste tipo de processos de produção. No contexto da arquitetura e do ambiente construído, o recurso a fabrico aditivo cerâmico apresenta grandes potencialidades. Portanto, tendo este fator como premissa, o objectivo principal desta investigação foca-se na exploração deste processo de fabrico para o desenvolvimento de componentes estruturais arquitetónicos, mais especificamente, um sistema de colunas de desenho personalizado e estruturalmente otimizado.

Neste contexto, procura-se desenvolver conhecimento sobre este processo de fabrico aditivo, tentando não só perceber e explorar as suas potencialidades, assim como compreender as suas limitações, no que diz respeito ao desenvolvimento de grelhas estruturais reticuladas que constroem um determinado objeto.

Finalmente, considerando-se os recursos que as ferramentas de desenho computacional introduziram em diversos campos de trabalho, procura-se também nesta investigação, a exploração desse tipo de ferramentas, visando auxiliar e agilizar o processo de concepção, definição e otimização do desenho dos diferentes componentes estruturais. Assim, procura-se desenvolver conhecimento neste tópico também, tentando perceber a sua viabilidade no dia a dia da arquitetura e construção.

1.2. Organização de Tese

A presente investigação organiza-se em cinco capítulos, em que cada um deles é composto por um conjunto de subcapítulos, que se dedicam a questões específicas, dentro do tema a ser estudado.

O primeiro capítulo da investigação — *1. Introdução* — enuncia os vários temas estudados, assim como uma breve exposição da sua metodologia e organização.

O segundo capítulo — *2. Enquadramento* — enquadra as várias temáticas presentes na investigação no contexto da arquitetura e ambiente construído. Começa por mostrar como o processo de fabrico aditivo tem sido explorado, de seguida foca-se no uso da cerâmica, em conjunto com esse processo de fabrico, para finalmente produzir componentes estruturais arquitetónicos. A esta contextualização sucede-se uma exposição da utilização de desenho computacional no auxílio do processo de concepção e produção de obras arquitetónicas e finalmente, encerra-se o capítulo com um breve enquadramento da coluna, expondo diferentes estágios do seu desenvolvimento, e de desenho paramétrico na arquitetura.

O terceiro capítulo — *3. Definição do Sistema de Colunas* — documenta todo o processo de definição do sistema de colunas, expondo todos os estágios de desenvolvimento do seu desenho. É com base na definição do sistema, que depois o capítulo se foca nas temáticas de análise e otimização estrutural para definir um protótipo a produzir.

O quarto capítulo, — *4. Produção do Protótipo* — com base no trabalho feito previamente, centra-se na descrição e análise do processo de fabrico do protótipo selecionado. Em primeiro lugar, demonstra-se a preparação do objeto tridimensional para fabrico aditivo e de seguida documenta-se a produção dos primeiros protótipos, assim como a otimização do processo de impressão. Por fim, termina com a análise de dois cenários de fabrico. Um primeiro cenário de produção do protótipo em partes e um segundo através da produção numa só peça.

Finalmente, o quinto capítulo — *5. Conclusão* — dedica-se à exposição das conclusões retiradas com a investigação e enuncia algumas questões a poder ser desenvolvidas em trabalhos futuros.

2. Enquadramento

O conteúdo deste capítulo foca-se no estudo sobre os diversos temas desenvolvidos nesta investigação — exposto de *2.1. Fabrico Aditivo e Desenho Estrutural* a *2.4. Coluna e Arquitetura* — e tem como objectivo contextualizar essas mesmas temáticas no mundo da arquitetura e enquadrar a presente investigação nesses mesmos temas.

Assim, documentando aqui um pouco daquilo que, atualmente, tem sido desenvolvido e estudado na arquitetura, dentro dos temas de fabrico aditivo, cerâmica, desenho paramétrico e computacional, pretende-se dar a conhecer esse mesmo trabalho, mostrando projetos específicos que se mostram importantes e marcantes no desenvolvimento e evolução das diversas temáticas aqui abordadas.

2.1. Fabrico Aditivo e Desenho Estrutural

1 - Ver <http://contourcrafting.com/>

2 - Ver <https://www.cybe.eu/>

Já em 1995, no livro *Digital Design Media*, Mitchell & McCullough fazem referência ao potencial do fabrico aditivo (eles usaram o termo *Incremental Forming*). Este método mostra grande potencial em vários campos, desde a indústria aeroespacial até usos domésticos, o fabrico através do processo aditivo, mostra grande versatilidade e a indústria da construção não foi excluída. (Kieran & Timberlake, 2004)

Hoje em dia, estes processos são um dos métodos de produção mais auspiciosos. Nos últimos anos, houve investimentos crescentes, tanto por empresas privadas como por instituições académicas, na pesquisa desses métodos. Muitos desses trabalhos concentram-se no fabrico aditivo de estruturas com o objetivo de aplicar este processo à escala de construção. Existem dois métodos principais que estão a ser desenvolvidos: a produção dos elementos estruturais diretamente no local, ou o fabrico de componentes estruturais seguidos pela sua montagem na obra.

Das diversas investigações desenvolvidas sobre o fabrico *in situ*, destacam-se algumas empresas e instituições académicas, começando pela *Contour Crafting*¹. Esta é uma das empresas mais antigas a trabalhar neste processo e as primeiras publicações remontam a 1998. Desde então, o seu trabalho evoluiu e hoje em dia, dedicam-se ao fabrico de casas produzidas no local (*Figura 2.1.a.*), como um único elemento, através da sobreposição de camadas de betão. No entanto, este método ainda é condicionado pelas dimensões da impressora, por isso só têm a capacidade de produzir casas de dois andares. O próximo passo é alcançar o fabrico de edifícios multifamiliares completos, produzidos no local (Khoshnevis, 2004).

Outra empresa que trabalha neste tipo de processo é a *CyBe Industries*², no entanto, em vez de trabalhar com uma impressora de grande escala, eles empregam apenas um braço robótico (*Figura 2.1.b.*). Este processo dá-lhes um certo grau de liberdade formal, permitindo-lhes experimentar diferentes abordagens e estratégias. Além disso, usam um material diferente, uma argamassa, que solidifica em poucos minutos e atinge força estrutural em apenas uma hora, reduzindo consideravelmente o tempo de construção.

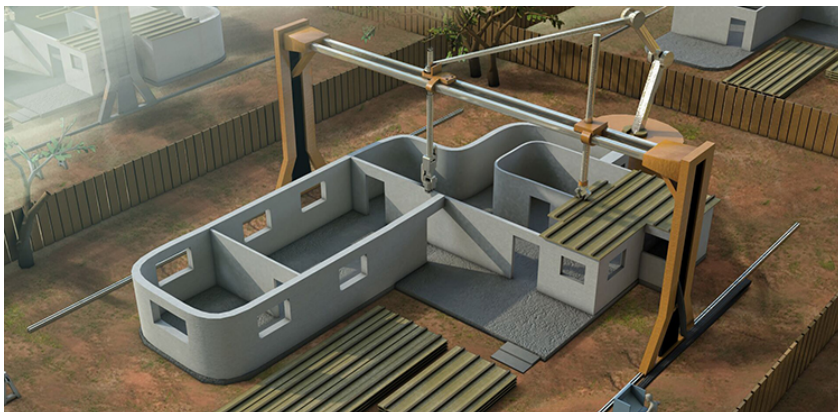
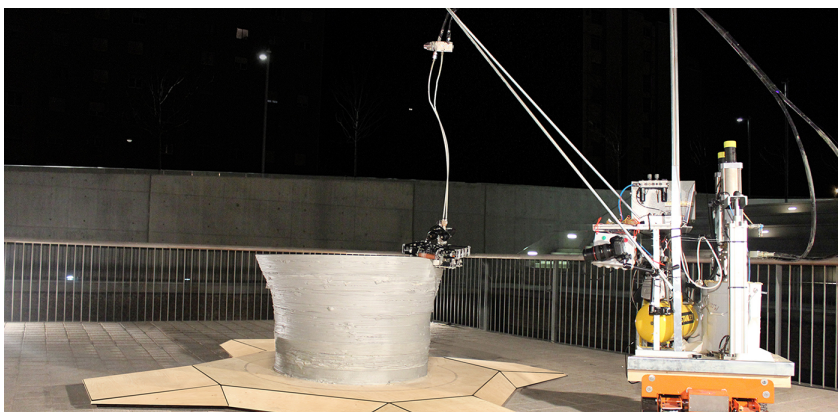


Figura 2.1.a. - Esquema tridimensional da produção de uma casa, através de fabrico aditivo em betão, Contour Crafting.

Figura 2.1.b. - Impressão de parte de uma parede curva, através de fabrico aditivo em betão, recorrendo a um braço robótico, CyBe Industries.

Figura 2.1.c. - Um dos primeiros testes de impressão, recorrendo à família de pequenos robots, Institute for Advanced Architecture of Catalonia, 2015.

Figura 2.1.d. e 2.1.e. - Impressora de SLS (Selective Laser Sentering), usada para fabrico aditivo de componentes estruturais e Radiolaria Pavillion, D-Shape, 2008.



- 3 - Ver <https://iaac.net/>
- 4 - Ver <https://d-shape.com/>
- 5 - Ver <http://www.winsun3d.com/En/>
- 6 - Ver <http://www.block.arch.ethz.ch/brg/>
- 7 - Ver <https://www.ethz.ch/en.html>
- 8 - Ver <https://www.amalgamma.org/>
- 9 - Ver <https://www.ucl.ac.uk/>
- 10 - Ver <http://www.xtreee.eu/>

Por sua vez, no *Institute for Advanced Architecture of Catalonia*³ (IAAC), um grupo de investigação liderado por *Sasa Jokic* e *Petr Novikov*, desenvolveu uma nova técnica que lhes permite quebrar uma limitação específica dos processos de fabrico aditivo: os objetos que este processo produz são limitados pelo tamanho da máquina. Isto é, a máquina tem de ter uma área de trabalho tão grande como o próprio objeto pretendido. Apresentando *minibuilders* (Figura 2.1.c.), uma família de robots de pequena escala, foi possível fabricar objetos muito maiores que os próprios robots. Em vez de termos uma máquina de grande escala, o objeto é construído por um grupo de robots menores que trabalham com um objetivo comum (Novikov, 2015).

Quanto ao uso de fabrico aditivo para a produção de componentes estruturais, empresas como a *D-Shape*⁴ e a *Winsun3D*⁵ estão a desenvolver abordagens interessantes. No caso da *D-Shape*, o processo de fabrico é ligeiramente diferente, pois funciona com o depósito de areia por camadas que vão sendo coladas seletivamente (Figuras 2.1.d. e 2.1.e.), permitindo a exploração de novas capacidades formais (Wolfs, 2015). Já a *Winsun3D*, surge com o objetivo de criar habitação de forma rápida e barata, devido à problemática de sobrepopulação existente no país. Durante o processo de fabrico são adicionados reforços metálicos ao betão para lhe dar mais estabilidade, e assim é capaz de produzir componentes de maior escala (Figura 2.1.e.) (Bresello, 2014).

Dentro deste mesmo método de fabrico, temos o *Block Research Group*⁶ (ETH Zurich⁷), que através do processo de fabrico aditivo desenvolveu um sistema otimizado de lajes em betão (Figura 2.1.g.). É um sistema composto por lajes individuais inspiradas nas coberturas das catedrais góticas, que pela sua forma côncava permite suportar cargas pesadas. No entanto, é 70% mais leve do que os métodos convencionais e mais sustentável, visto que utiliza menos material (López et al, 2014; Block et al, 2016).

Um outro exemplo de produção de elementos estruturais através de fabrico aditivo provém da *Amalgamma*⁸. Composta por alunos de mestrado da *Bartlett School of Architecture*⁹, esta equipa de investigação desenvolveu um método para o fabrico de componentes estruturais em betão (Figura 2.1.h.) e construiu uma coluna para mostrar os seus resultados (Figura 2.1.i.). Este método combina o processo de extrusão com a impressão em pó, criando assim uma forma de extrusão suportada. O betão é extrudido camada a camada sobre uma plataforma de material granular que é depositado em torno da estrutura (Morby, 2016).

Por último, a empresa *XtreeE*¹⁰, sediada na França, tem-se dedicado à investigação de processos de fabrico aditivo de elementos estruturais em betão. Em 2017, após o desenvolvimento de vários protótipos, testaram a produção de uma coluna fabricada através de métodos digitais num projeto de uma escola em *Aix-en-Provence*, na França (Figura 2.1.j.). Com cerca de 4 metros de altura, é uma estrutura orgânica, semelhante a uma treliça, que se tenta integrar no edifício e na paisagem, fazendo lembrar raízes de uma árvore (Baranyk, 2017).

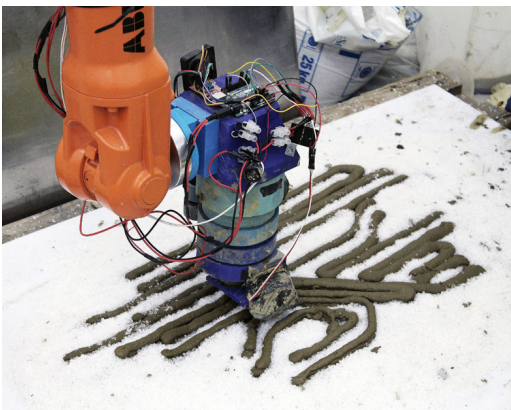
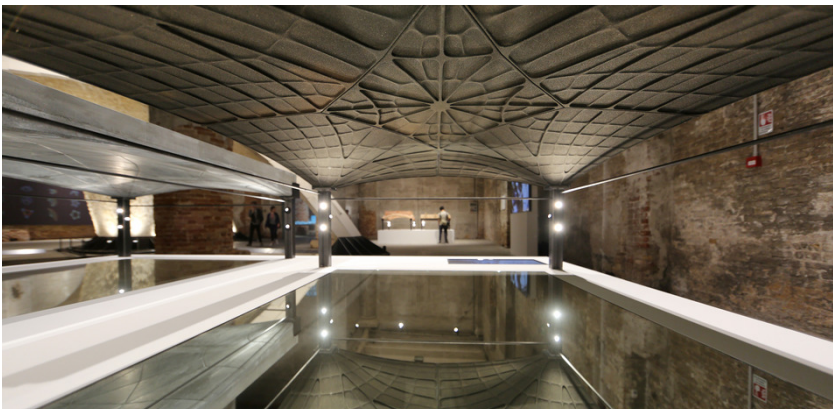


Figura 2.1.f. - Fabrico de um componente estrutural de uma casa, Winsun3D, 2014.

Figura 2.1.g. - Sistema de lajes construído através de fabrico aditivo em betão, Block Research Group, 2016.

Figura 2.1.h. e 2.1.i. - Fabrico de coluna através de uma extrusão suportada, Amalgamma, 2016.

Figura 2.1.j. - Coluna em treliça, construída através de fabrico aditivo em betão, XtreeE, 2017.



2.2. Cerâmica 3D e Arquitetura

11 - Ver <http://www.jennysabin.com/>

A arquitetura tem visto um crescente uso de ferramentas de fabrico digital no auxílio à construção de componentes arquitetónicos ou até de edifícios. Uma grande parte das experiências desenvolvidas tem-se focado no uso de betão, como material de construção principal. Recentemente, e cada vez mais frequentemente, procuram-se alternativas ao uso deste material, em busca de novas hipóteses que apresentem outras características, mais sustentáveis e capazes de alargar as possibilidades do processo de fabrico aditivo. Uma das alternativas que mais tem mostrados projetos e resultados interessantes é o uso da cerâmica, um material tradicional do meio construtivo, no desenvolvimento deste processo.

No espectro internacional podemos referir diversas investigações e projetos que trabalham sobre o processo de fabrico aditivo cerâmico, no entanto considerando o propósito desta investigação, iremos concentrar-nos em projetos de componentes estruturais arquitetónicos.

Um projeto simples mas que nos interessa referir, desenvolvido pelo *Sabin Design Lab*¹¹, é o *Polybrick* (Figura 2.2.a.). Este trabalho tem por base uma investigação prévia focada na viabilidade da utilização da pasta cerâmica em fabrico aditivo e faz uso de ferramentas de desenho computacional para auxiliar o desenho e o fabrico de tijolos cerâmicos personalizáveis, para a construção de uma das primeiras paredes, com geometria curvilínea, produzida unicamente através de fabrico aditivo cerâmico. Este projeto utiliza materiais de construção baratos e a tecnologia de fabrico aditivo disponível, e através dela produz componentes estruturais arquitetónicos com um sistema de encaixe no próprio desenho das peças, retirando assim a necessidade de encaixes mecânicos externos (Sabin, 2014).

Um outro projeto com uma premissa formal também bastante simples desenvolvido por *Brian Peters*, durante um *workshop* de 6 semanas no *European Ceramic Work Center* na Holanda, baseia-se na criação de um sistema de fabrico arquitetónico com grande potencial. *Building Bytes* (Figura 2.2.b.), surge assim, com os objetivos de fabrico *in situ* e complexidade formal, procurando algum grau de liberdade e personalização formal, reimaginando um antigo componente estrutural, o bloco, tal como o *PolyBrick*. Com este projeto foram desenvolvidos

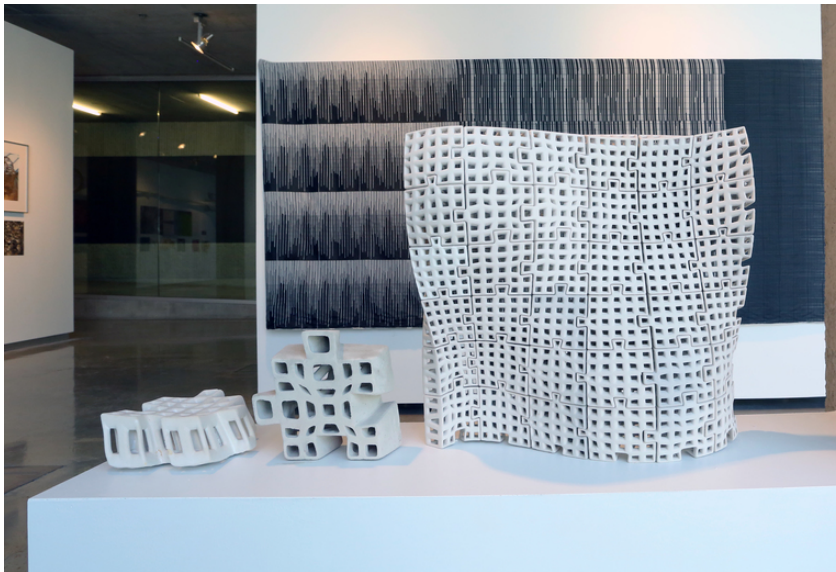
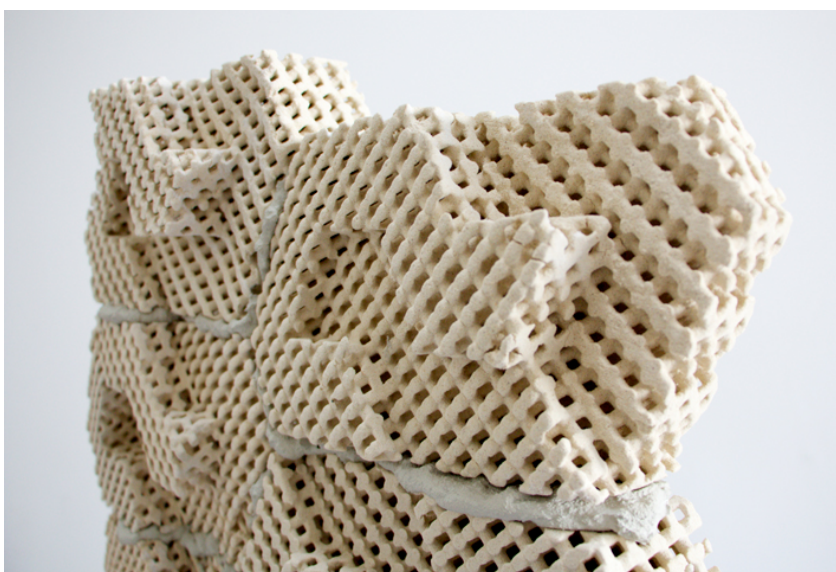
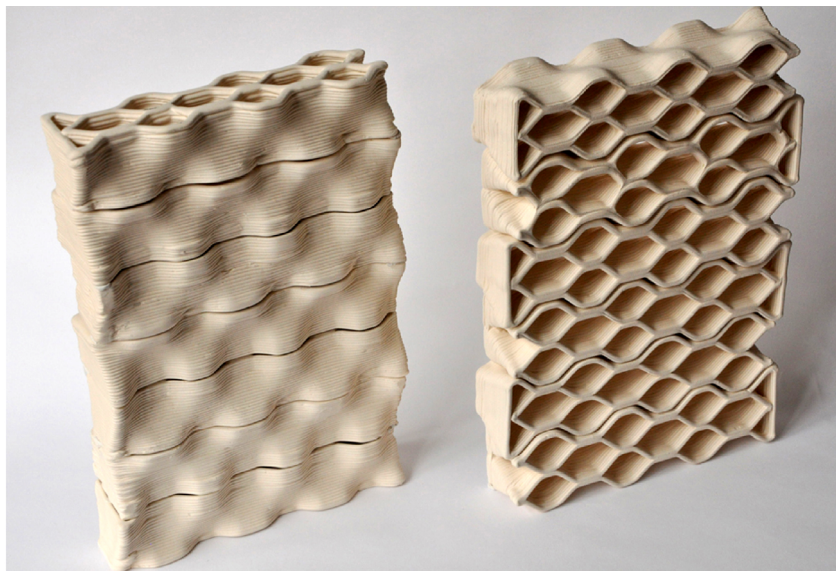


Figura 2.2.a. - Polybrick, Sabin Desing Lab, 2014.

Figura 2.2.b. - Building Bytes, Blocos Modulares com Estrutura Interna Hexagonal, Brian Peters, 2012.

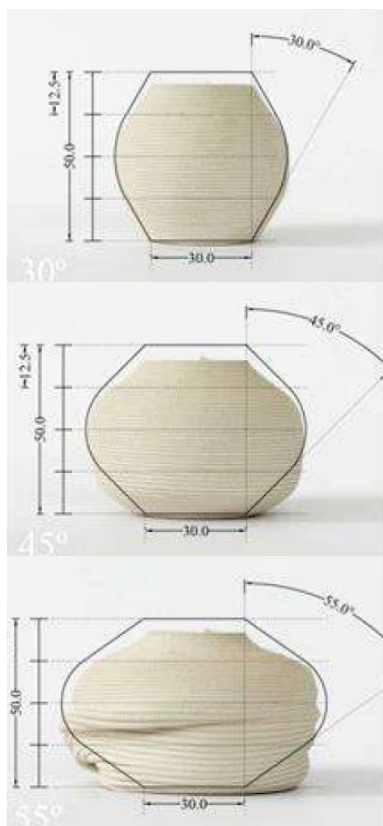
Figura 2.2.c. - Cool Brick, Emerging Objects, 2015.



12 - Ver <https://www.emergingobjects.com/>

13 - Ver <https://www.aclab-idegui.org/>

Figura 2.2.d. - Testes com diferentes amplitudes, Figueiredo *et al*, 2017.



quatro tipos de blocos que demonstram o potencial deste sistema: blocos nervurados para colunas, blocos com encaixe no seu desenho para arcos e cúpulas, blocos em forma de “X” para revestimento e blocos modulares com estrutura interna hexagonal. Assim, *Building Bytes* oferece aos arquitetos novas oportunidades de desenho que um simples bloco de extrusão em fiação não permite. Através deles é possível desenhar superfícies exteriores irregulares, enquanto a sua estrutura interna pode ser elaborada para diminuir o seu peso ou até aumentar a rigidez nos pontos mais frágeis de um certo objecto (Etherington, 2012; Peters, 2013).

No âmbito do desenvolvimento de fabrico aditivo cerâmico e com o objetivo de fabricar componentes estruturais, surgiu na Universidade Técnica de Darmstadt, uma investigação que explora também a produção de blocos cerâmicos personalizados. Neste contexto, a investigação procurou conhecer as propriedades estruturais do material, aferindo a viabilidade dos blocos cerâmicos produzidos por fabrico aditivo no ambiente construído. Para mostrar os benefícios desta tecnologia foram desenvolvidos três protótipos: um bloco sem restrição de forma, onde o tamanho do lote não influencia o custo de produção, um bloco com superfícies padrão, cujo desenho dificulta a sua produção através de um molde ou por extrusão convencional, e finalmente, um bloco com múltiplas funções integradas num único material, onde uma parte dele atua como elemento estrutural e a outra age como isolamento, através de um padrão desenhado no bloco (Witte, 2016).

Até aqui abordamos projetos preocupados com o seu desempenho formal e estrutural, no entanto o fabrico aditivo cerâmico permite trabalhar outras questões. Devido às características térmicas do material abre-se um outro campo de trabalho a ser desenvolvido. Aqui interessa observar o projeto *Cool Brick* (Figura 2.2.c.) desenvolvido pelos *Emerging Objects*¹². Estes blocos inspiram-se num antigo sistema de arrefecimento por evaporação (*Muscatese Window*), que combina um invólucro de madeira, um *mashrabiya*, um elemento arquitetónico característico árabe, com um recipiente poroso de água. Através da evaporação dessa água o ar mais fresco é introduzido no edifício, arrefecendo de forma passiva as temperaturas interiores do mesmo (Schiano-Phan, 2004). Os blocos são modulares, com encaixe próprio no seu desenho, e possuem uma treliça tridimensional como estrutura interna, permitindo absorver água e deixar o ar passar através do bloco. São capazes de ser empilhados para criar uma espécie de tela que protege a parede e a sua forma permite cobrir uma grande parte da superfície dela, aumentando o seu desempenho térmico (Fratello & Rael, 2015).

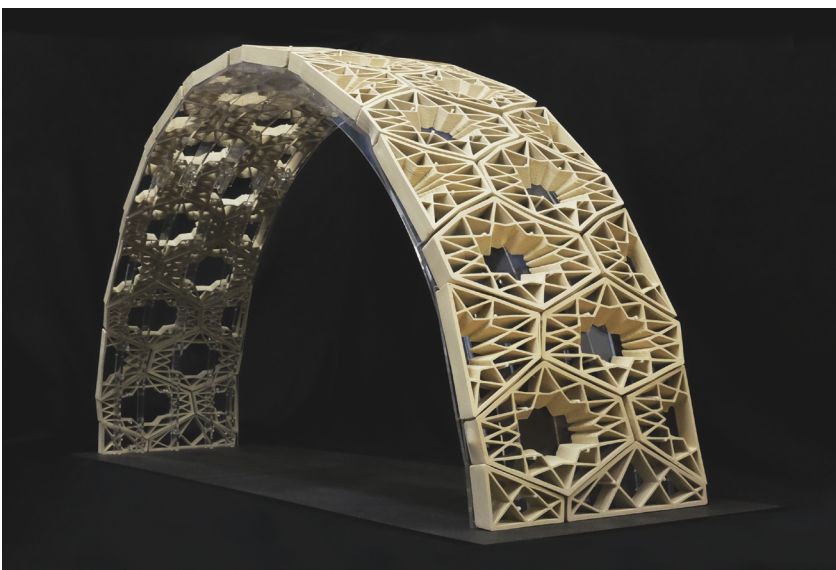
No entanto, não é apenas no panorama internacional que vemos um crescente interesse sobre fabrico aditivo cerâmico. Em Portugal esse entusiasmo é posto em prática através de uma série de investigações e desenvolvimento de protótipos com diferentes propósitos e características, em torno da temática, levados a cabo no *Advanced Ceramics R&D Lab*¹³ (ACLab), sediado no Instituto de Design da Universidade do Minho, em Guimarães. Apesar de ser um laboratório



Figura 2.2.e. - Wave Wall, Advanced Ceramics R&D Lab, 2017.

Figura 2.2.f. - Odin Wall, Advanced Ceramics R&D Lab, 2017.

Figura 2.2.g. - Hexashade, Advanced Ceramics R&D Lab, 2018.



recente, apresenta já ideias e projetos promissores que procuram contribuir para a integração deste processo de fabrico na arquitetura.

Um dos primeiros protótipos desenvolvidos neste laboratório inspira-se formalmente no bloco tradicional de construção e resulta de uma investigação que procurou compreender as potencialidades e limitações que o material exhibe, relativamente ao desenho de superfícies curvas (*Figura 2.2.d.*). Com esta investigação surge então, a *Wave Wall* (*Figura 2.2.e.*), um sistema de blocos cerâmicos de superfícies curvas, que através de ferramentas de desenho computacional e fabrico aditivo, tem por objectivo trabalhar o revestimento exterior de fachadas. Assim, cada bloco possui uma geometria irregular e singular, com uma estrutura interna hexagonal que se adapta à forma geral de cada bloco.

Uma derivação deste projeto é que consegue desenvolver novas possibilidades é a *Odin Wall* (*Figura 2.2.f.*). Tal como o protótipo anterior, este é um projeto que trabalha a integração de ferramentas digitais no processo de concepção e construção de revestimento de fachadas. Procura também explorar formalmente, o grau máximo vertical possível de uma curvatura, que este processo de fabrico consegue executar, sem que o protótipo colapse. No entanto, pretende desenvolver a possibilidade de criar blocos cerâmicos sem restrições de forma. Neste caso específico, este protótipo explora o potencial de desenvolver um sistema de desenho e construção que se aplique a superfícies curvas (Figueredo *et al*, 2017).

Finalmente, também fazendo parte das investigações desenvolvidas neste laboratório, temos o *Hexashade* (*Figura 2.2.g.*). Este projeto foi desenvolvido no âmbito da tese de mestrado em arquitetura, de João Carvalho, na Escola de Arquitetura da Universidade do Minho. Com um foco na integração de ferramentas digitais em arquitetura, este projeto faz uso de desenho computacional e fabrico aditivo cerâmico para desenvolver um sistema de sombreamento através de componentes arquitetónicos inteiramente customizáveis. Para efeitos de estudo real, teve-se em consideração o próprio laboratório para o desenvolvimento do protótipo. Assim, este projeto apresenta-se como um arco de sombreamento, constituído por diversas peças hexagonais, encaixadas umas sobre as outras, cuja estrutura interna foi definida, recorrendo a estudos de movimentação solar para otimizar o sombreamento do laboratório (Carvalho, 2018).

2.3. Desenho Computacional e Arquitetura

14 - Ver <https://www.nox-art-architecture.com/>

15 - Ver <https://www.foga.com/>

16 - Ver <https://www.fosterandpartners.com/>

17 - Ver <http://www.fr-ee.org/>

18 - Ver <http://fukasas.com/>

Se parece que ainda é desconhecido o vencedor da corrida para construir o primeiro edifício habitável, produzido inteiramente através de fabrico aditivo (Ravenscroft, 2017), desde a década de 1990, os modelos computacionais têm sido usados constantemente para o desenvolvimento de elementos estruturais.

Um dos exemplos mais conhecidos que introduziu o uso de modelos computacionais como ferramenta ativa para a definição do desenho estrutural e arquitetónico foi o *H2O Expo Pavilion* (Figura 2.3.a.), na Holanda, pelos *Nox Architects*¹⁴ (1997). Este pavilhão, caracterizado por um ambiente interno baseado em metáforas sobre a água, combina uma continuidade entre a superfície interna e a geometria externa, onde o chão se torna parede e a parede se torna tecto. Essa complexidade formal foi alcançada através de um desenho, e consequente fabrico, desenvolvido inteiramente em computador.

Durante o mesmo ano, um outro projeto estava a ser desenvolvido com a ajuda de ferramentas computacionais. O Museu *Guggenheim* (Figura 2.3.b.), em *Bilbao*, de *Frank Gehry*¹⁵ (1997) também beneficiou de software computacional, neste caso o *CATIA*, para desenhar a estrutura e os componentes da fachada. Esta ferramenta permitiu também ter uma estimativa de custos detalhada e realista antes de avançar para a construção, o que resultou, em consequência, na construção dentro do tempo e orçamento, o que é raro neste tipo de arquitetura, devido à magnitude do projeto e à própria complexidade presente nele (Mitchell, 2001; Lindsey, 2001).

Desde o aparecimento destas ferramentas, muitas entidades optaram por introduzi-las no seu processo de trabalho. Nos últimos anos vemos mais e mais exemplos desta abordagem assistida por computador para auxiliar e agilizar o processo de definição dos elementos estruturais, como por exemplo, a cobertura do átrio principal do *British Museum* (Figura 2.3.c.) por parte dos *Foster & Partners*¹⁶ (2000), o Museu *Soumaya* (Figura 2.3.d.) de *Fernando Romero*¹⁷ (2011) e o *Aeroporto Internacional Shenzhen Bao'an* (Figura 2.3.e.) por parte do *Studio Fuksas*¹⁸ (2013). E ainda mais recentemente foi inaugurada a primeira ponte pedonal desenhada e fabricada inteiramente através de métodos digitais (Koslow, 2016).



Figura 2.3.a. - H2O Expo Pavilion, Nox Architects, 1997.

Figura 2.3.b. - Museu Guggenheim, Bilbao, Frank Gehry, 1997.

Figura 2.3.c. - Cobertura do átrio principal do Museu Britânico, Foster & Partners, 2000.



No parque urbano de *Castilla-La Mancha*, em Madrid, encontramos o projeto desenvolvido por uma equipa de investigação constituída por *Areti Markopoulou, Rodrigo Aguirre, Alexandre Dubor e Jayant Khanuja*, em colaboração com a *D-Shape* (2016). Esta ponte pedonal (*Figura 2.3.f*), com cerca de 12 metros de comprimento e 1,75 metros de largura, foi totalmente desenvolvida com recurso a modelos computacionais e fabrico aditivo, que tentam refletir as complexidades da natureza, mas ao mesmo tempo otimizar a distribuição de material, minimizar o desperdício e maximizar a performance estrutural (Valencia, 2017).

Os exemplos aqui expostos, e muitos outros, servem neste trabalho, para auxiliar num enquadramento abrangente, do modo como os modelos computacionais têm permitido implementar não só processos globais de *design-to-fabrication*, mas também a ideia de *mass customization*, relacionando a configuração espacial, estrutura e material, para informar o design arquitetónico e as suas performances.

Uma das mais valias dos modelos computacionais é permitir a personalização dos dados de controlo numérico, para a materialização de um objeto, incorporando as propriedades do material, para otimizar o seu uso em técnicas específicas de fabrico aditivo. Essas mesmas propriedades podem introduzir restrições ao desenho, ou seja, diferentes materiais tem propriedades distintas, logo as informações para a máquina devem ser adaptadas de acordo com as características de cada material para se obter um protótipo viável.

Estes métodos digitais permitem também explorar uma ideia de personalização em massa. O processo de fabrico convencional opta pela simplicidade à complexidade, no entanto essa rigidez já não é necessária, porque as máquinas controladas por computador são capazes de fabricar objetos singulares e complexos sem um custo proibitivamente caro. A variedade formal dos objetos já não afeta negativamente a economia de produção. Esta ideia é particularmente adequada para a arquitetura, porque os edifícios são geralmente singulares e personalizados, e assim este conceito, permite estabelecer um conjunto de soluções variadas e otimizadas em resposta a um determinado problema de projeto, por exemplo a exploração de componentes estruturais de formas e dimensões únicas, que respondem às cargas estruturais de uma melhor maneira (Kolarevic, 2003).



Figura 2.3.d. - Museu Soumaya, Fernando Romero, 2011.

Figura 2.3.e. - Aeroporto Internacional Shenzhen Bao'an, Studio Fuksas, 2013.

Figura 2.3.f. - Ponte pedonal, Madrid, Institute for Advanced Architecture of Catalonia e D-Shape, 2016.



2.4. Coluna e Arquitetura

A aplicação de princípios paramétricos, ou relações associativas, para a definição da forma e dimensões de componentes arquitetônicos e estruturais identifica-se, desde logo na arquitetura da antiguidade clássica. No século XIV, com o surgimento do Renascimento, e o renovado interesse na arquitetura greco-romana em Itália, as linguagens arquitetónicas deste período retomam abordagens que remetem para a utilização de princípios algorítmicos. Inclusive, de inspiração antropomórfica, isto é, em que o desenho é derivado da inferência de proporções do corpo humano para formalizar as suas próprias proporções.

No âmbito desta investigação interessa-nos documentar uma breve análise aos princípios subjacentes do desenho das colunas no período da antiguidade clássica, abordando as ordens inseridas em cada um dos períodos, para assim documentar os princípios geométricos e proporcionais presentes nelas. Após documentadas as ordens, pretende-se estabelecer um paralelo à contemporaneidade, abordando projetos e investigações que procurem uma reinterpretação do desenho destes elementos estruturais com base em relações paramétricas.

A coluna é um dos elementos mais importantes e característicos não só do período grego e romano, mas da arquitetura em geral. De uma forma simples, ela é geralmente constituída pela base, fuste e capitel, e por motivos perspéticos, o seu topo é ligeiramente mais estreito que a base para acentuar a monumentalidade do edifício. Estas normas de composição atingem a sua maturidade no século V a.C. com a criação das ordens Dórica, Jónica e Coríntia, e a partir do século I a.C. são reinterpretadas no decorrer do Império Romano, surgindo assim a ordem Toscana e a ordem Compósita (Janson, 1992).

A ordem Dórica surgiu, de acordo com Vitruvius, com a construção de um santuário na encosta de Peloponeso, uma península no sul da Grécia. Representativa do homem, nesta ordem as colunas procuram associar a elegância no desenho à estabilidade da estrutura, e segundo Vitruvius, possuem solidez e elegância viril. Geralmente vemos esta ordem aplicada no exterior dos templos dedicados a deuses masculinos e das três ordens gregas é a mais simples, desenhando um edifício baixo e de características sólidas (*Figura 2.4.a.*). No que diz respeito às suas proporções, a sua altura é entre quatro a seis vezes mais alta que



Figura 2.4.a. - Partenon, Grécia, como exemplo da ordem Dórica.

Figura 2.4.b. - Erecteion, Grécia, como exemplo da ordem Jónica.

Figura 2.4.c. - Templo de Zeus, Grécia, como exemplo da ordem Coríntia.



a dimensão da base, aludindo assim à proporção do Homem, em que o pé masculino é a sexta parte da sua altura (Vitruvius, s.d.).

Em paralelo ao desenvolvimento da ordem Dórica, mas a leste da Grécia, surge a ordem Jónica. Tal como a ordem anterior, esta usa as proporções do Homem como base para o seu desenho, no entanto introduz algumas diferenças, criando um novo estilo. Ao contrário da ordem Dórica, os templos construídos recorrendo à ordem Jónica, apresentam-se mais delicados e esbeltos que os templos dóricos (*Figura 2.4.b.*). Representando a mulher, esta ordem possui no seu desenho uma base mais larga, no entanto a sua altura passa a ser oito vezes a sua base, ao contrário das seis vezes da ordem Dórica. No caso específico da ordem Jónica, o capitel introduz uma analogia vegetal na coluna devido à criação de um novo elemento, as volutas. Estas remetem para os cabelos femininos, e devido à sua proporção, lembram a delicadeza da mulher (Vitruvius, s.d.).

Com a progressão dos tempos e dos cânones os ideais de subtiliza e beleza alteraram-se, e assim a ordem Dórica passou a ter no seu desenho sete diâmetros de altura e a ordem Jónica nove diâmetros.

Ainda durante o período grego mas já no final do século V a.C. apareceu a terceira e última ordem grega, a Coríntia. Esta nova ordem não introduz alterações drásticas ao desenho da coluna e apresenta-se como sendo uma derivação da ordem Jónica, resultado de um forte trabalho decorativo sobre ela (*Figura 2.4.c.*). O elemento mais marcante nesta ordem é o seu capitel característico, como um sino invertido coberto de folhas de acanto e coroado com subtis volutas jónicas, tendo-se generalizado no período romano. É geralmente usada em interiores, pois é claramente uma ordem mais decorativa e trabalhada. Quando comparada às outras duas ordens, a Coríntia é das três a mais esbelta, geralmente com dez diâmetros de altura. (Vitruvius, s.d.)

Com a entrada no período romano vemos surgir mais duas ordens, no entanto estas não introduzem mudanças significativas às anteriores até porque o seu desenho é sempre baseado nas ordens gregas. No caso da ordem Toscana, estamos perante uma mera simplificação da ordem Dórica (*Figura 2.4.d.*), e nela vemos o acréscimo de uma base, que não existia anteriormente, e mantém presente os sete diâmetros de altura (Craven, 2017).

No caso da ordem Compósita, até à época renascentista, ela era vista como uma versão tardia da ordem Coríntia e surge como um desenho enriquecido dela. É uma ordem com desenho misto, na qual se vê no capitel as volutas da ordem Jónica e as folhas de acanto da ordem Coríntia (*Figura 2.4.e.*). Também de igual forma à Coríntia, esta ordem desenvolve-se sobre dez diâmetros de altura (Janson, 1992).

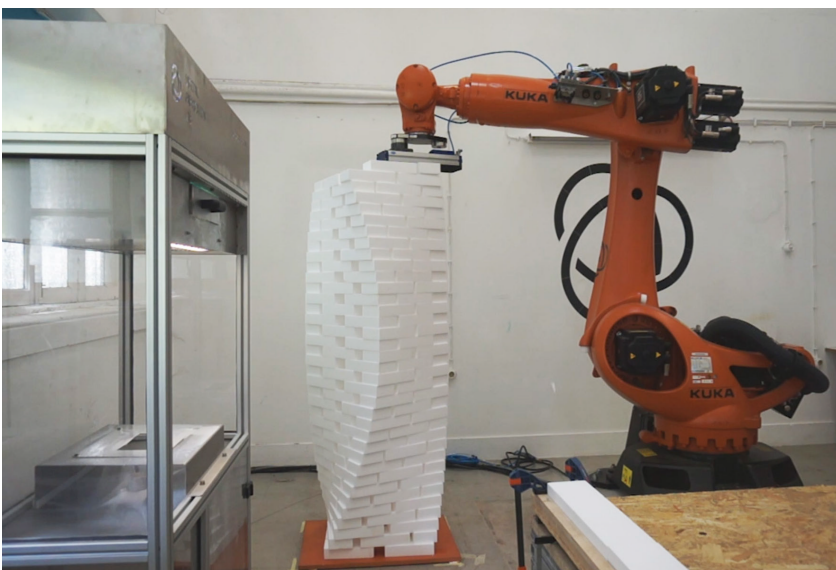
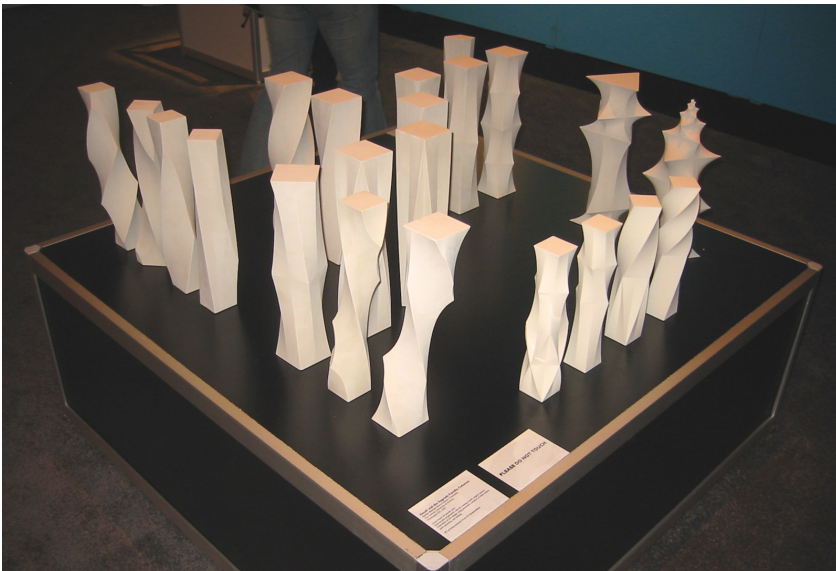


Figura 2.4.d. - Praça de S. Pedro, Cidade do Vaticano, como exemplo da ordem Toscana.

Figura 2.4.e. - Capitel da Basílica da Estrela, Lisboa, como exemplo da ordem Compósita.

Figura 2.4.f. - Estudos da coluna de Antoni Gaudí, Carlos Barrios.

Figura 2.4.g. - Montagem de coluna, baseada na obra de Hestnes Ferreira, através e braço robótico, José Sousa, 2016.



No que à contemporaneidade diz respeito, é visível que o interesse da integração de princípios que estabelecem relações entre o todo e as partes dos objetos arquitetónicos, não se desvaneceu. Aliás, nos dias de hoje, e mais do que nunca, esse interesse é crescente. Nos dias de hoje, este processo é auxiliado por processos de modelação computacional, que exponenciam as oportunidades formais e linguísticas a serem aplicadas em projeto.

Como um bom exemplo de complexidade formal, temos a catedral da Sagrada Família, umas das obras mais conhecidas do arquiteto catalão *Antoni Gaudí*. O edifício, apesar de ter começado a ser construído em 1884, ainda não está terminado, e recentemente começamos a ver a introdução de processos de modelação e desenho paramétrico para auxiliar e acelerar a sua construção. É no âmbito da construção de umas das naves laterais deste templo que surge uma investigação, por parte de *Carlos Barrios*, que pretende integrar modelos paramétricos na arquitetura. Isto com o objetivo de aplicá-los à geração de formas complexas, que irão depois atuar como colunas dessa mesma nave (*Figura 2.4.f*).

Esta investigação inicia-se pela análise da documentação existente, e através dela foi possível desenvolver um esquema paramétrico como elemento fundamental para a geração do desenho das colunas. Este processo permite não só recriar as formas originais pensadas por *Gaudí*, como também confere alguma liberdade criativa para gerar novas formas (*Barrios, 2005*).

Com uma premissa similar, mas agora em contexto nacional, a investigação desenvolvida em torno da obra do arquiteto Raúl Hestes Ferreira, por parte de José Sousa, foca a integração de desenho paramétrico, assim como ferramentas computacionais, na tradicional construção em tijolo. Apesar das inovações a nível de fabrico, este método construtivo requer ainda mão de obra hábil, pelo que nos dias de hoje é cada vez mais complicado encontrar. Assim, esta investigação propõe fundamentalmente um processo de montagem do tijolo, recorrendo à tecnologia robótica (*Figura 2.4.g*). Através da análise da obra do arquiteto Raúl Hestes Ferreira, procura também a criação de modelos paramétricos para gerar desenhos de elementos arquitetónicos, assim como controlar a máquina e o processo de montagem. Finalmente, através da produção de uma coluna à escala real, recorrendo a estes métodos digitais, esta investigação procura mostrar a sua relevância na inovação da tradição (*Sousa et al, 2016*).

3. Definição do Sistema de Colunas

19 - Ver <https://www.rhino3d.com/>

20 - Ver <https://www.grasshopper3d.com/>

No presente capítulo pretende-se expor e documentar, o objeto central desta investigação, a definição de um sistema de colunas, recorrendo a desenho computacional, através da utilização do software de modelação tridimensional, *Rhinoceros 3D*¹⁹, e o seu editor gráfico integrado de algoritmos, o *Grasshopper*²⁰.

Num primeiro momento, este sistema define-se através de desenho computacional, procurando desenhar uma grelha estrutural reticulada, construída por elementos tubulares e de funcionamento paramétrico, que se desenrola na superfície externa de uma coluna. Este facto resultou numa experimentação com diversas abordagens — exposto de 3.1. *Diagrama de Voronoi* a 3.5. *Complexidade e Biomorfismo* — procurando responder aos vários problemas encontrados durante este percurso.

Portanto, desde a sua fase mais embrionária até a um estado de consistência satisfatória, o sistema de colunas passou por diversos estágios. Apesar de terem propósitos específicos para o seu desenvolvimento, cada um deles contribuiu para a evolução do sistema. O presente capítulo pretende documentar cada um desses estágios, mostrando os princípios por detrás de cada um deles, assim como mostrar os vários problemas encontrados e de que forma se foram solucionando.

Finalmente, o capítulo foca-se na análise estrutural — exposto em 3.6. *Análise Estrutural* — documentando o processo aplicado, e os resultados obtidos com essa análise. Consequentemente, possibilita a introdução e respectiva documentação da otimização estrutural — exposto em 3.7 *Otimização Estrutural* — aplicada no sistema de colunas, para seleção de um protótipo final a ser produzido — exposto em 3.8. *Definição do Protótipo a Produzir*.

3.1. Diagrama de *Voronoi*

21 - Na matemática, um Diagrama de Voronoi é um tipo de decomposição de um dado espaço determinado pela distância para uma determinada família de subconjuntos no espaço.

Como referido previamente, a primeira estratégia a ser explorada na definição de uma grelha estrutural reticulada passou pela associação de um diagrama de *Voronoi*²¹ à superfície externa da volumetria geral da coluna.

Genericamente entende-se que, este tipo de diagrama permite decompor um certo espaço tridimensional ou geometria bidimensional, neste caso a superfície externa da coluna, num certo número de células. Estas são definidas através de uma população de pontos no espaço, e a partir dos limites de cada uma dessas células, é possível estabelecer uma grelha estrutural que irá, mais tarde, ser usada na construção da coluna.

Primeiramente, para se compreender o problema desta abordagem é necessário perceber que o processo de fabrico aditivo cerâmico, através de *Liquid Deposition Manufacturing* (LDM), possui uma condicionante a ter em conta. Este processo demonstra uma fraca capacidade de produzir objetos com amplitudes superiores a 30°, em relação ao eixo Z, correndo o risco do objeto cair e a impressão falhar (Figueiredo *et al*, 2017).

No contexto do *Grasshopper*® é possível explorar várias estratégias e por isso, levantam-se algumas considerações a ter em conta. Para a definição das células através do diagrama de *Voronoi* podemos ter duas abordagens diferentes, uma primeira através de uma população de pontos aleatória, sobre a superfície externa da coluna, ou uma segunda com uma população regular, ou seja, uma situação em que a distribuição dos pontos é mais controlada. Apesar de serem métodos distintos de população de pontos e com diferentes restrições, o problema é comum em ambos os métodos.

Portanto, tendo em conta a condicionante do processo de fabrico, no caso de uma população de pontos aleatória, esta irá gerar geometrias com um número de lados variado, que depois serão interligadas, pelo computador, da maneira que este achar correta, criando a grelha estrutural. Por isso, estas formas a serem geradas a partir deste tipo de população, irão ser geometrias irregulares, consequentemente criam uma grelha estrutural com amplitudes tanto inferiores como superiores a 30°. Por sua vez, através da população de pontos regular,

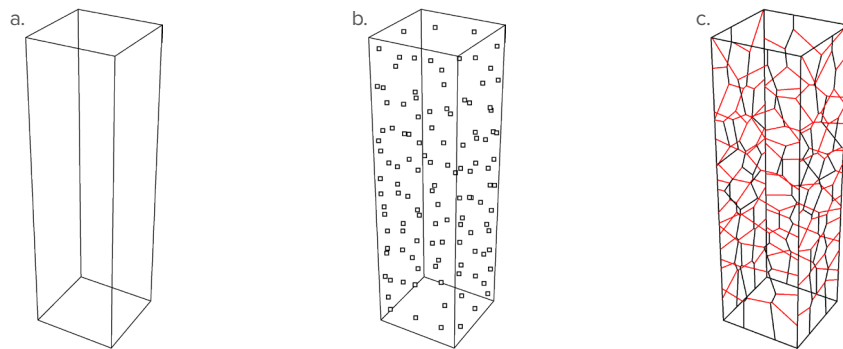
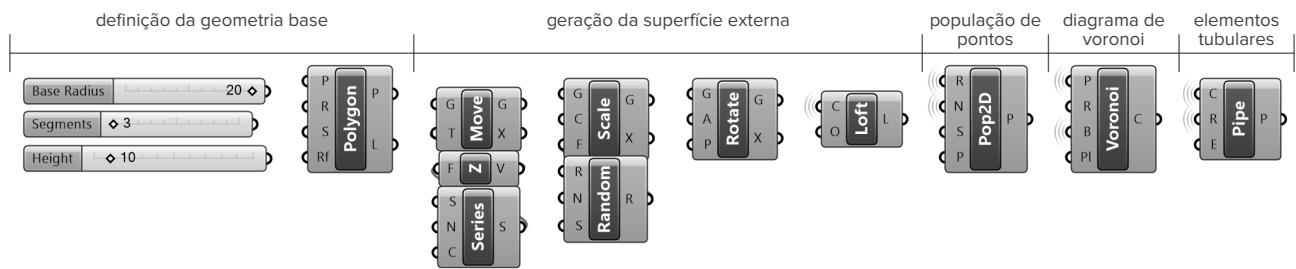
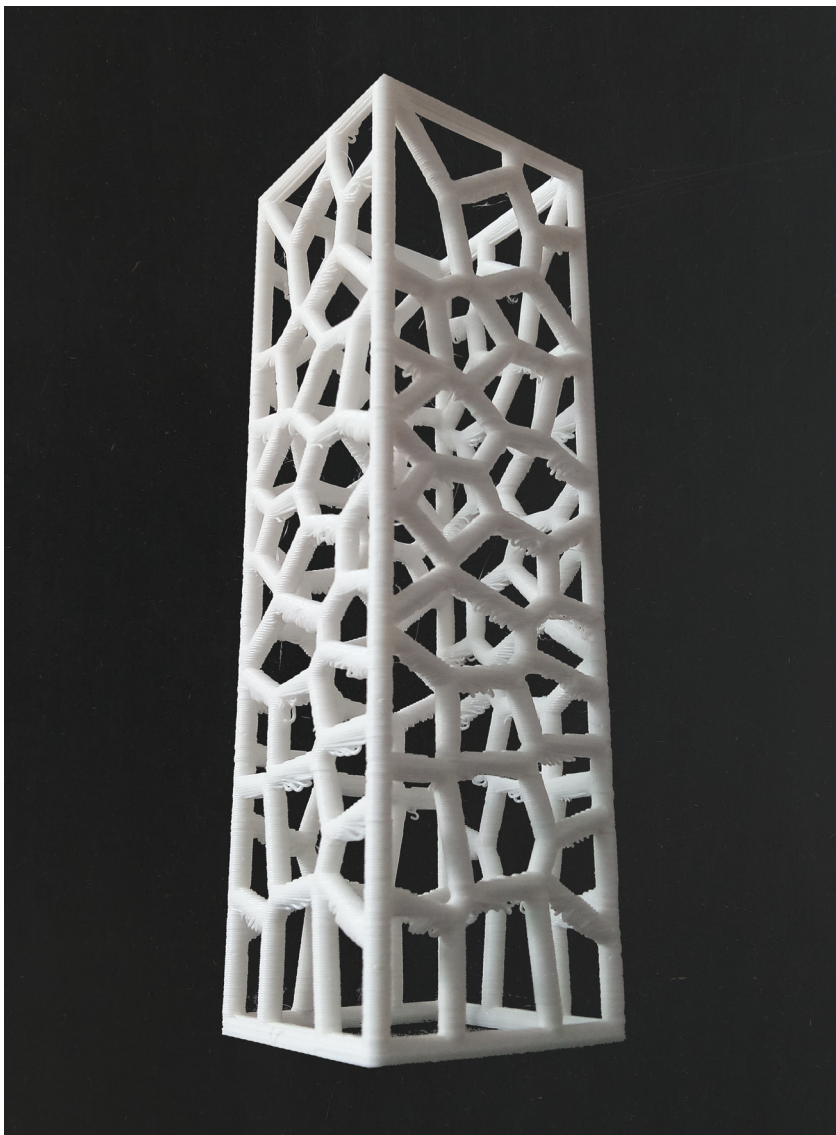


Figura 3.1.b. - Código que define desenho do sistema.

Figura 3.1.c. - Esquema evolutivo do modelo: a. forma inicial, b. população aleatória de pontos e c. geração de células, onde a traço vermelho se observam amplitudes superiores a 30°.

Figura 3.1.d. - Coluna impressa - Fotografia do protótipo.



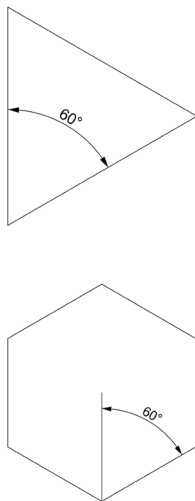
as geometrias geradas tem princípios formais similares umas às outras, no entanto, variam entre formas quadrangulares e retangulares. Logo, com este tipo de população e devido aos ângulos rectos criados pelas geometrias, a grelha estrutural irá apresentar sempre momentos com amplitudes superiores a 30°, sendo irrelevante a sua orientação na superfície externa da coluna.

Com o auxílio do modelo computacional (*Figura 3.1.b.*), que se inicia pela definição da morfologia geral da coluna, — com uma base quadrangular — seguida da distribuição de pontos e finalmente a aplicação de um algoritmo de *Voronoi* para a definição da grelha estrutural reticulada (*Figura 3.1.c.*), foi possível prever quais os elementos lineares da grelha que não cumprem as amplitudes inferiores a 30°. Apesar disso, executou-se uma impressão do protótipo (*Figura 3.1.d.*), recorrendo ao processo de *Fused Filament Fabrication* (FFF), por não ser um método tão trabalhoso e complexo como o fabrico aditivo cerâmico, com o objetivo de expor as problemáticas desta estratégia.

Por isso, com a presente abordagem, a construção do protótipo através de fabrico aditivo cerâmico torna-se problemática. Devido a uma incapacidade de controlar o desenho das células, que definem a grelha estrutural, verifica-se que o cumprimento de amplitudes inferiores a 30° raramente é cumprido. Com esta estratégia, a coluna apresenta momentos em que as inclinações são demasiado fortes ou até mesmo horizontais, consequentemente, com o estado atual da tecnologia deste processo, esta estratégia tornava impossível o fabrico do protótipo.

3.2. Grelhas Regulares

Figura 3.2.a. - Esquema demonstrando a amplitude obtida com o uso das grelhas estruturais triangulares e hexagonais.



Com o objetivo de continuar a exploração do uso de grelhas estruturais reticuladas na definição de componentes arquitetónicos, e com intuito de introduzir um grau maior no controlo sobre o desenho que as define, neste caso sobre a geometria das células, testou-se a associação de grelhas regulares à superfície exterior da coluna.

Ao contrário do estágio anterior, que podia gerar geometrias irregulares ou regulares, sendo estas últimas restritas a quatro lados, aqui recorreu-se a grelhas baseadas em geometrias regulares, nomeadamente formas triangulares e as hexagonais, numa tentativa de controlar o desenho das células que definem a grelha estrutural. Com o uso destas grelhas, independentemente do tipo de população de pontos considerada, sabe-se que a forma final das células serão sempre triângulos ou hexágonos. Portanto, esta estratégia permite, logo à partida, ter uma noção concreta da forma geral da grelha estrutural, ao contrário do estágio anterior. Contudo, os resultados desta experimentação foram similares nas duas grelhas consideradas e apresentaram algumas semelhanças ao primeiro estágio.

Com esta abordagem, verificou-se um controlo sobre o desenho das geometrias geradas. Ao invés delas apresentarem formas variadas com amplitudes diferentes, como é visível no estágio anterior, agora verifica-se uma forma comum com uma amplitude de 60° aplicada a toda a grelha estrutural (*Figura 3.2.a.*). No entanto, esta evolução mostrou-se insuficiente e o problema com as altas amplitudes persistia. Como referido anteriormente, uma amplitude inferior a 30° é crucial para fabricar um protótipo sem risco de este ruir sobre si mesmo durante a impressão.

Através da construção do modelo computacional (*Figura 3.2.b.*), que procurava introduzir grelhas regulares como elemento definidor da retícula estrutural, foi possível identificar todos os elementos lineares que não cumprem as amplitudes requeridas. Tal como o estágio anterior, o modelo começa pela definição da geometria geral da coluna, — também de base quadrangular — seguido de uma distribuição de pontos pela superfície externa, contudo neste momento, ela é feita de uma forma regular. Finalmente, é aplicado o algoritmo para a geração da grelha estrutural reticulada (*Figura 3.2.c.*). Com recurso à produção

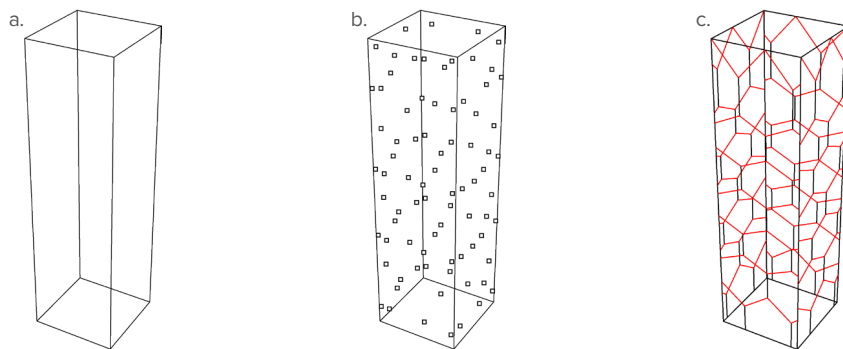
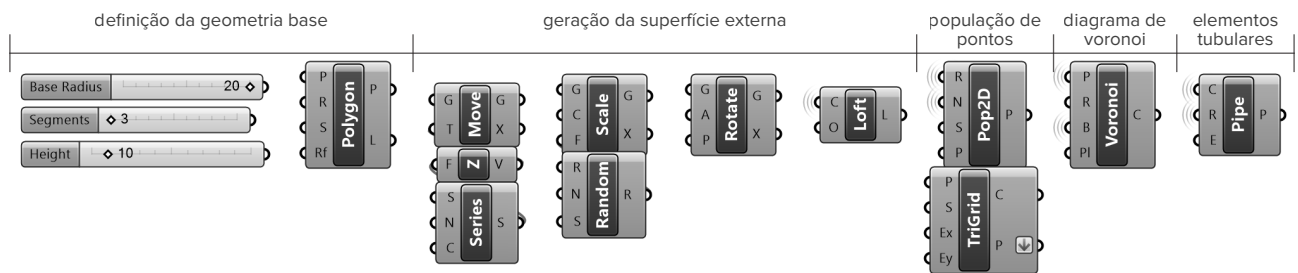
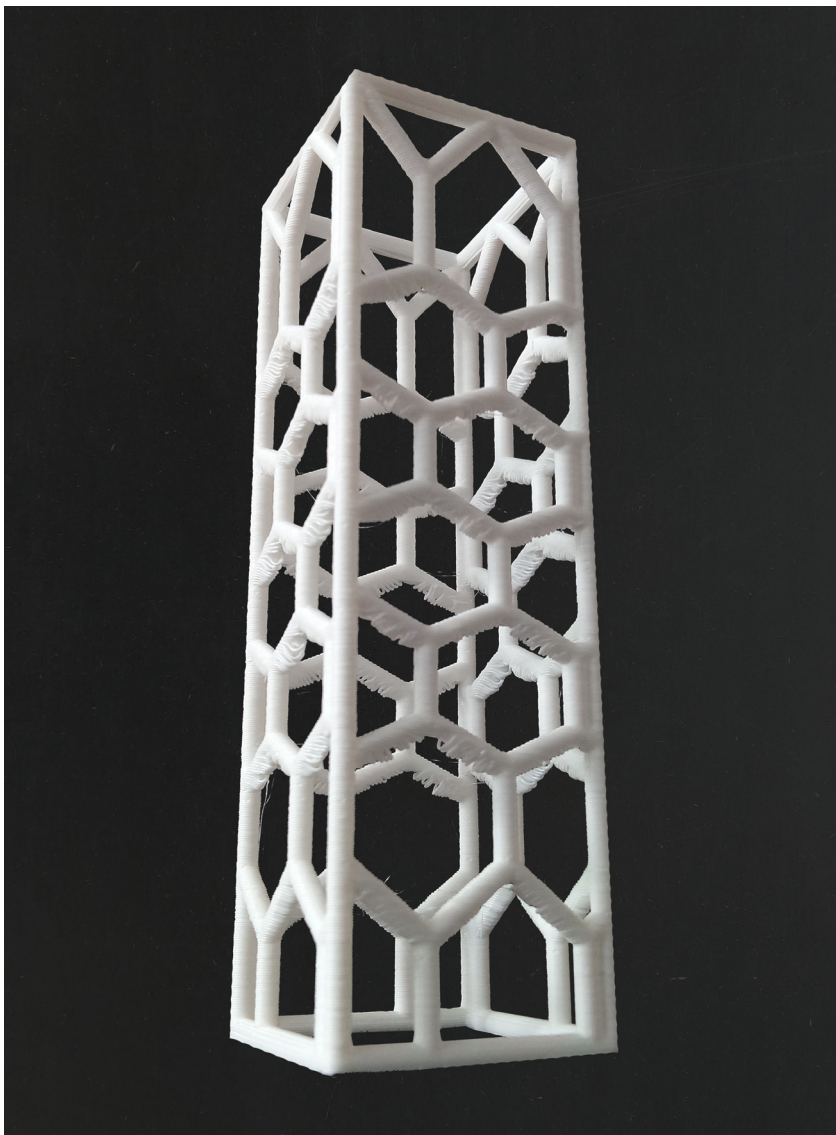


Figura 3.2.b. - Código que define desenho do sistema.

Figura 3.2.c. - Esquema evolutivo do modelo: a. forma inicial, b. população regular de pontos e c. geração de células, onde a traço vermelho se observam amplitudes superiores a 30°.

Figura 3.2.d. - Coluna impressa - Fotografia do protótipo.



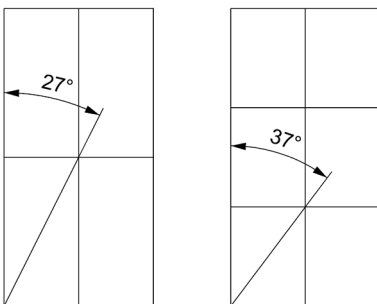
do protótipo, através do processo FFF (*Figura 3.2.d.*), foi possível comprovar as problemáticas presentes com esta abordagem.

Neste contexto, após uma análise dos resultados encontrados, percebeu-se que o problema com a geração de ângulos de maior amplitude nas geometrias que constroem a grelha estrutural, residia no facto de ser o computador a controlar, de uma forma geral, o desenho das células que a definem. O utilizador é apenas capaz de definir uma forma base a ser aplicada à grelha, controlando a quantidade de polígonos e a sua dimensão. No entanto, não é capaz de criar ou modificar manualmente uma geometria específica, resultando na incapacidade de controlar completamente o desenho das células e os respetivos ângulos de abertura das amplitudes.

Assim, procurou-se uma reestruturação no processo de definição da grelha estrutural reticulada. Para isso propôs-se uma alteração sobre quem opera este processo, isto é, ao invés de permitir que o computador automatize o desenho das células, tentou-se que fosse o utilizador a defini-lo, garantindo um maior controlo sobre ele. O computador é apenas uma ferramenta, um meio para atingir um fim, e cabe ao utilizador controlar aquilo que é feito por ele.

3.3. Interligação de Pontos

Figura 3.3.a. - Esquema exemplificando o aumento das amplitudes com base no aumento das divisões verticais.



O presente subcapítulo apresenta um estágio da investigação que reflete sobre o trabalho desenvolvido e mostra alguma progressão na resolução dos problemas encontrados até então.

Neste estágio procurou-se fazer com que o utilizador tivesse maior controlo sobre o desenho das células que definem a grelha estrutural reticulada do sistema de colunas. Desta forma, tornou-se possível cumprir a condicionante de amplitudes inferiores a 30° , imposto pelo comportamento do material cerâmico, garantindo assim uma boa execução do protótipo através de fabrico aditivo. À semelhança dos estágios anteriores, a decomposição da retícula estrutural começa com uma população de pontos sobre a superfície externa da coluna. Contudo, neste momento, ao invés de se distribuírem os pontos através de modelos que geram malhas estruturais, definiram-se regras para o posicionamento de cada um deles.

Com esta alteração, verificou-se uma evolução no processo de definição da grelha estrutural reticulada, e portanto, a partir deste momento, é possível controlar, não só a posição individual dos vários pontos que compõem a grelha, mas também a quantidade de divisões horizontais e verticais em que retícula estrutural se desenvolve. Contudo, verificou-se que este facto teve repercussões nas amplitudes das células da retícula, no sentido em que, quanto mais divisões verticais forem introduzidas maiores serão as amplitudes presentes na grelha estrutural (*Figura 3.3.a.*). Apesar deste fator, esta estratégia permite-nos ter o controlo sobre o desenho das células, permitindo também garantir que as amplitudes de abertura da grelha serão sempre inferiores a 30° através de um desenho cuidado e pensado previamente.

Com base no modelo computacional estabelecido nesta estratégia (*Figura 3.3.b.*), que se inicia pela definição da geometria base da coluna, — mantendo-se com uma base quadrangular — seguido de uma distribuição controlada de pontos pela sua superfície e se encerra com a ligação dos pontos, um a um, para se obter a grelha estrutural pretendida (*Figura 3.3.c.*), tornou-se possível comprovar que a retícula estrutural cumpria a condicionante já estabelecida, viabilizando o seu fabrico.

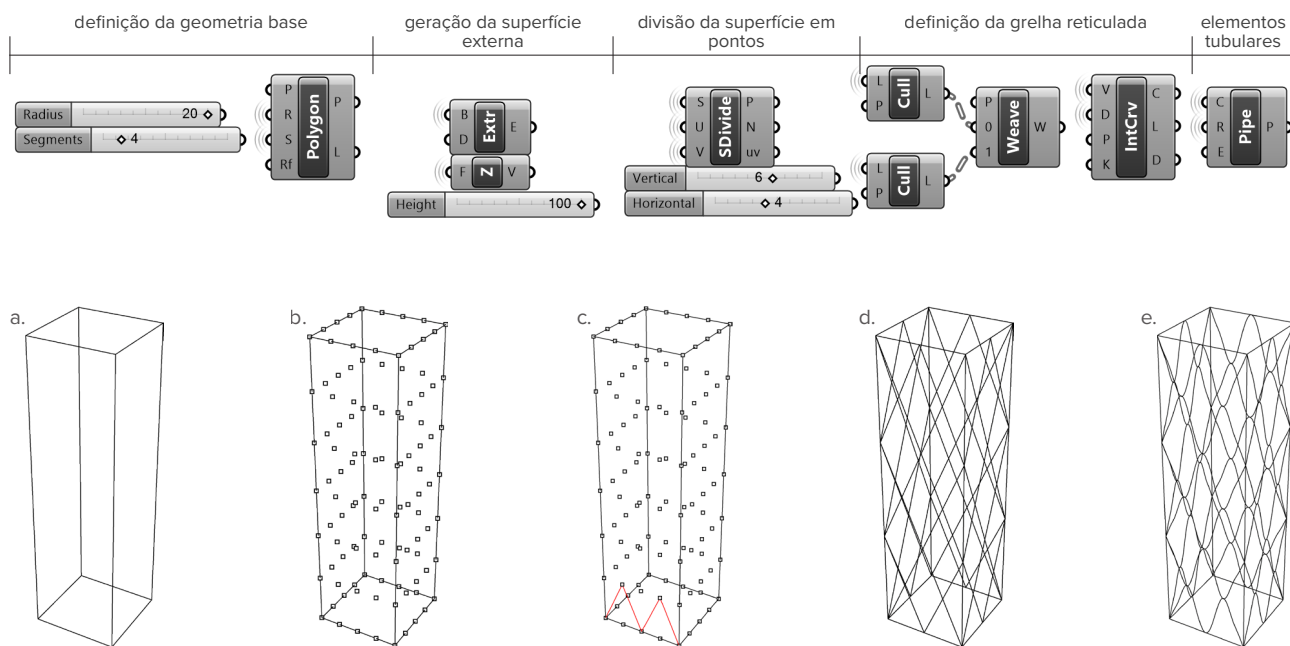


Figura 3.3.b. - Código que define desenho do sistema.

Figura 3.3.c. - Esquema evolutivo do modelo: a. forma inicial, b. definição manual de pontos, c. definição do percurso da linha, d. geração da grelha estrutural e e. suavização de curvas.

Figura 3.3.d. - Coluna impressa - Fotografia do protótipo.

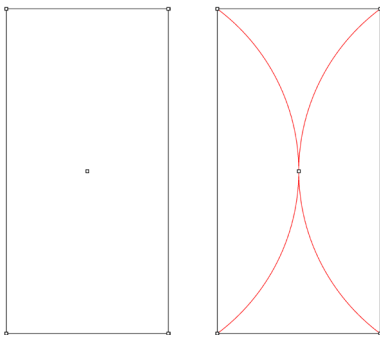
Após se verificar a capacidade da definição de modelos computacionais para a geração de colunas através de retículas estruturais regulares, decidiu-se experimentar a implementação de princípios biomórficos — documentado em detalhe no subcapítulo 3.5. *Complexidade e Biomorfismo* — para a geração da mesma. Esta experimentação começou com uma simples suavização dos limites das células e com este intuito em foco, foi necessário ultrapassar algumas questões.

Durante a exploração deste processo de suavização, procurou-se que as geometrias não se limitassem apenas a linhas retas quebradas e se apresentassem como elementos fluídos e orgânicos, tais como ramos de uma árvore, no entanto com a implementação desta estratégia, verificou-se que os nós gerados entre as nervuras não apresentavam uma continuidade estrutural satisfatória (*Figura 3.3.d*). Esta situação acontece, devido ao facto da geração das células ser feita na horizontal, em torno da volumetria geral da coluna, e quando aplicada a suavização das curvas, esta irá seguir essa mesma orientação, resultando assim na criação de amplitudes altas no desenho dos nós.

Portanto, apesar do desenho base das células deter amplitudes inferiores a 30°, possibilitando a produção da coluna, os nós entre elas apresentam não só problemas de continuidade estrutural, inviabilizando estruturalmente o protótipo, mas também dificultam o fabrico aditivo cerâmico devido ao seu desenho.

3.4. Subsuperfície Recursiva e Suavização de Curvas

Figura 3.4.a. - Esquema mostrando o desenho do padrão introduzido na grelha estrutural reticulada.



Após a execução de tarefas concentradas no controlo do desenho da grelha estrutural reticulada, o presente estágio debruça-se sobre um trabalho de redefinição do desenho dos nós. No entanto, para se encontrar a solução para este problema foi necessária uma reestruturação da construção da grelha estrutural, que por sua vez se reflete no código que a define.

De uma forma conceptual, a evolução do trabalho nesta fase, representa uma mudança na orientação da construção da coluna, e consequentemente, na sua morfologia. Isto é, por oposição de uma geração horizontal das nervuras, estas passam a ser desenvolvidas na vertical, resolvendo assim o problema da continuidade estrutural que os nós apresentavam no estágio anterior. No entanto, o desenho computacional que gera todo este processo sofreu algumas alterações, que em última análise, resultou na sua simplificação.

Anteriormente, as células que compoñham a grelha estrutural eram definidas por um conjunto de pontos e, ligando-os um a um, definia-se o desenho da coluna. Agora, com uma mudança no paradigma de definição da retícula estrutural e de modo a simplificar o processo, a superfície externa da coluna é dividida em subsuperfícies, das quais o utilizador apenas terá de definir um desenho padrão numa das células, e assim, esta é aplicada a todas as outras subsuperfícies, desenhando a grelha estrutural. Neste caso, definiu-se um desenho em “X”, passando pelas extremidades e pelo centro da subsuperfície (*Figura 3.4.a.*).

Nesto contexto, o modelo computacional (*Figura 3.4.b.*), ilustra o processo de geração do componente estrutural, começando pela definição da sua base, seguido do desenho do seu padrão, que se aplica, de modo recursivo, por toda a coluna (*Figura 3.4.c.*).

Tal como no estágio anterior, para facilitar e agilizar o processo computacional, as células são desenhadas como linhas retas quebradas e só depois se introduzem princípios biomórficos, através da suavização dos seus limites. No entanto, ao contrário da etapa anterior, os nós entre nervuras deixam de ser um problema, pois a suavização, sendo executada na vertical, permite implementar um desenho aos nós que torna possível o seu fabrico através de material cerâmico (*Figura 3.4.d.*).

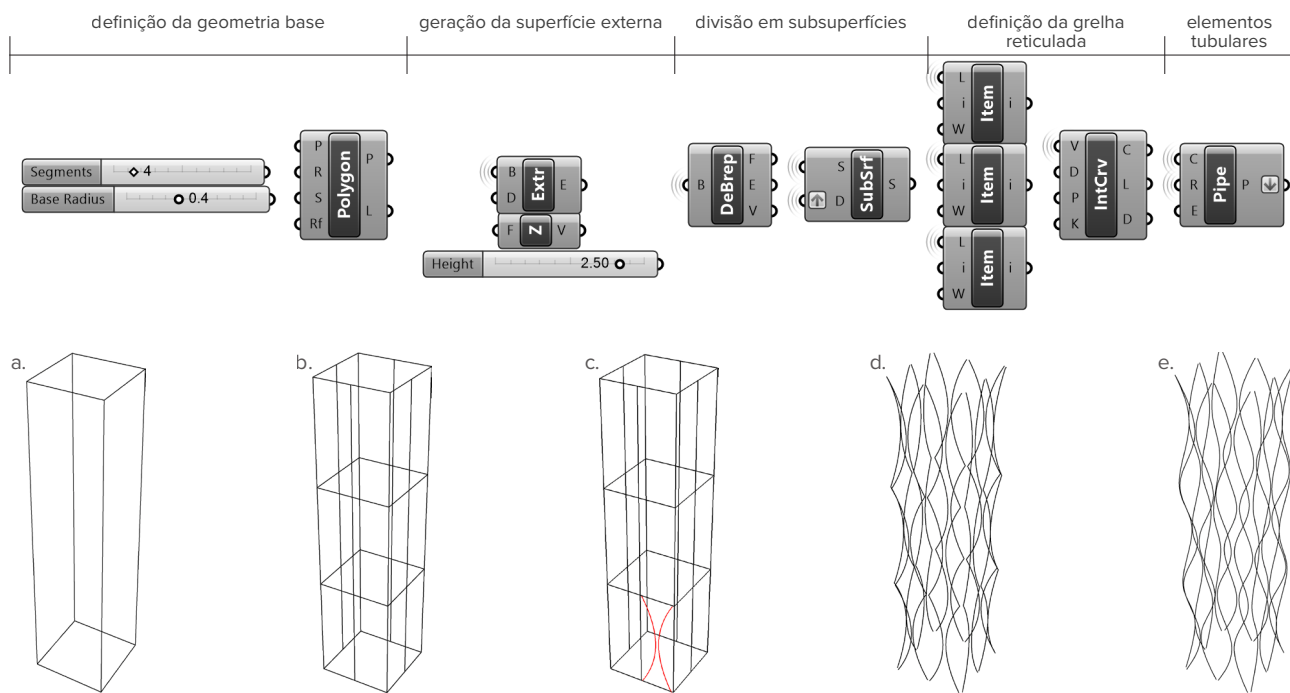


Figura 3.4.b. - Código que define desenho do sistema.

Figura 3.4.c. - Esquema evolutivo do desenho: a. forma inicial, b. divisão da superfície geral em subsuperfícies, c. definição do padrão, marcado a traço vermelho, d. repetição do padrão por todas as subsuperfícies e e. suavização de curvas.

Figura 3.4.d. - Coluna impressa - Fotografia do protótipo.

Os resultados obtidos neste estágio da investigação representam um ponto de partida que acreditamos ser consistente, uma vez que o processo computacional que desenha a grelha estrutural reticulada se encontra operacional, sendo possível controlar o número de divisões horizontais e verticais da coluna, assim como o diâmetro dos elementos tubulares que a constroem. Em simultâneo, garante-se uma fluidez estrutural ao longo da coluna, resultando num comportamento estrutural viável e cria-se, pela primeira vez, a possibilidade de explorar fabrico aditivo cerâmico, para a definição do caso de estudo e protótipos finais.

3.5. Complexidade e Biomorfismo

Figura 3.5.a. - Fotografia do tronco de uma planta Ficus,



Este estágio da investigação, surge com base no trabalho e nos pressupostos definidos nas fases anteriores e por isso, o paradigma e o processo que define a grelha estrutural, estabelecido anteriormente, é mantido. Assim sendo, nesta fase existe por sua vez, um trabalho que visa a implementação de características inspiradas na natureza, visando um desenho que replica a forma de um tronco da planta Ficus, pelo que também se considera uma abordagem biomórfica.

Até ao momento, para facilitar o processo de trabalho, a coluna sempre foi pensada como um elemento de base regular e extrusão linear no eixo Z. Contudo, como um dos objetivos é investigar a associação de princípios biomórficos a modelos generativos de componentes arquitetónicos, propôs-se explorar um desenho para a coluna que mimetiza a natureza, que eventualmente resulta numa estrutura formalmente mais complexa.

Com base na observação da estrutura dos troncos de plantas propôs-se uma relação formal mimética com a planta Ficus (*Figura 3.5.a.*) por duas razões. Em primeiro lugar, verificou-se que o desenho dos seus troncos parece remeter para uma grelha estrutural reticulada, criando assim um grande número de subtis elementos tubulares que suportam as folhas, daí o interesse de explorar este tipo de abordagem para o fabrico de componentes estruturais. Em segundo lugar, por ser uma estrutura vegetal, tem uma grande fluidez e organicidade formal, pelo que as suas nervuras parecem mover-se livremente, criando assim um desenho intrincado e complexo. Com a introdução destas características no sistema de colunas foi possível, não só considerar a geração de novas possibilidades formais, mas também interligar a ideia de biomorfismo com arquitetura.

Neste contexto, através da construção do modelo computacional (*Figura 3.5.b.*) e procurando um mimetismo com a planta, introduziu-se no sistema, uma variação na secção da coluna ao longo da sua altura, isto sempre com uma relação paramétrica com a área da sua base. Simultaneamente, implementou-se também uma rotação individual nessas mesmas secções, com implicações paramétricas no desenho da coluna tal como a variação da secção (*Figura 3.5.c.*). Neste caso, a introdução destas rotações afeta diretamente as amplitudes, por isso

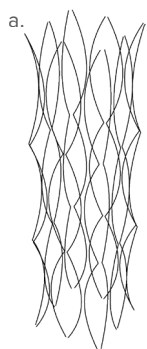
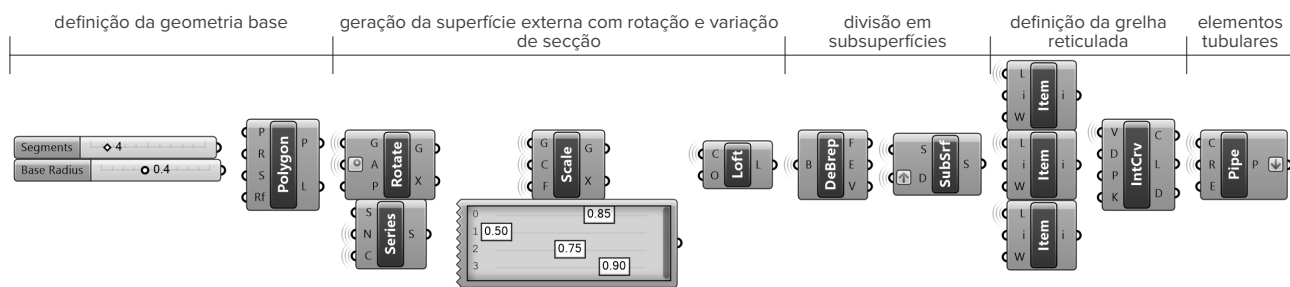


Figura 3.5.a. - Código que define desenho do sistema.

Figura 3.5.b. - Esquema evolutivo do desenho: a. grelha estrutural reticulada base, b. variação da secção ao longo da sua altura e c. rotação individual das secções.

Figura 3.5.c. - Coluna impressa - Fotografia do protótipo.



são executadas, tentando não exceder os 30°. Desta maneira, com a implementação destes atributos, foi possível enriquecer o desenho do sistema, remetendo-o para características formais mais próximas da planta Ficus (*Figura 3.5.d.*).

Nas últimas fases já se controlavam certos parâmetros do desenho da coluna, nomeadamente a forma e dimensão da base, assim como a sua altura e o número de divisões horizontais e verticais, o que por sua vez representava o controlo sobre o número de elementos tubulares e de nós respetivamente, presentes na coluna. Com o aumento da complexidade, ampliou-se o número de parâmetros sobre o controlo do utilizador, para a definição do sistema. Por consequência, isto representa um aumento nas possíveis soluções que podemos alcançar com base nas especificações iniciais introduzidas pelo utilizador.

Pretende-se com esta investigação desenvolver um código de desenho computacional que permita a geração de uma coluna que respeite certas condições. Estas são introduzidas no início do código, como simples valores pelo utilizador, nomeadamente a forma da base, a altura da coluna e a carga máxima que esta terá que suportar, para que depois esse mesmo código defina uma solução, entre várias possíveis, que seja otimizada para essas condicionantes.

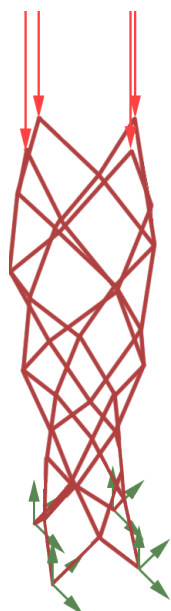
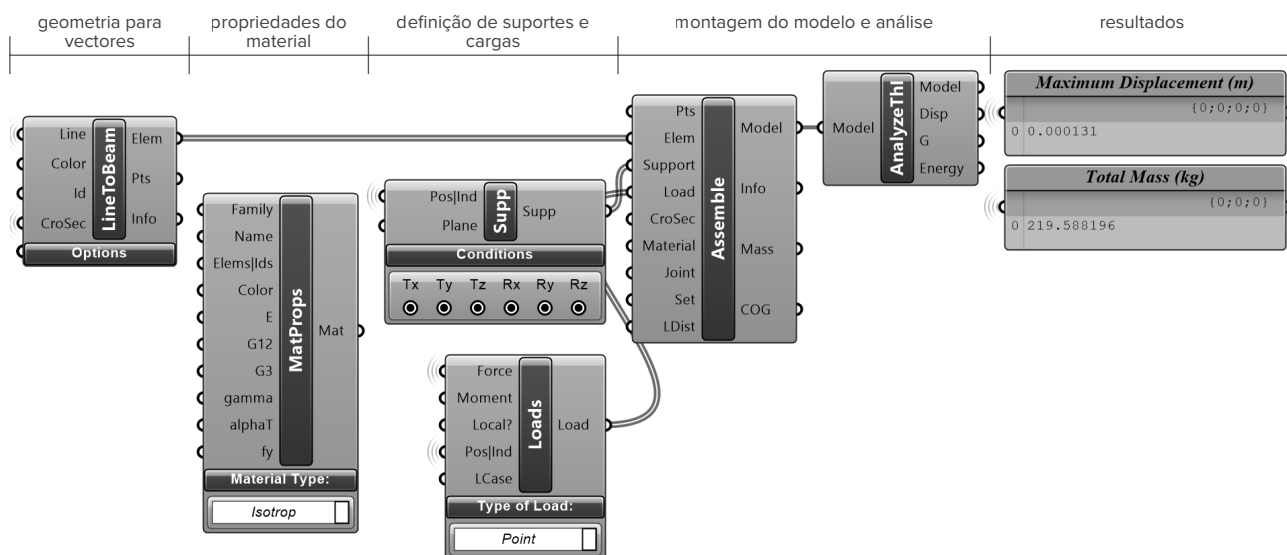
3.6. Análise Estrutural

22 - Ver <https://www.karamba3d.com/>

Com a obtenção de uma base consistente de trabalho, já com controlo sobre o código e os diversos parâmetros que desenham a coluna, começa-se a preparar um outro objetivo desta investigação, a otimização estrutural de componentes arquitetónicos com base em certas restrições. No entanto, não é possível iniciar esta tarefa sem primeiro conhecer as capacidades e limitações estruturais dos objetos, daí ser necessário, em primeiro lugar, executar a sua análise estrutural.

O objetivo por detrás desta análise é simples, verificar logo à partida se uma determinada coluna possui um comportamento estrutural viável ou não, e se esse fator se verificar, procura-se identificar dois valores, o peso total do objeto, em quilogramas, e a sua deformação axial, em milímetros, quando sobre influência de uma determinada força. Estes dois valores são fundamentais para o processo de otimização, isto porque o que se pretende nesse procedimento é a minimização destes mesmos valores e por isso, a análise estrutural representa, nesta investigação, um momento crucial no desenvolvimento dos elementos arquitetónicos otimizados. Através dela conseguimos definir os objetivos — minimização de peso e deformações — para o software de otimização.

Para se executar a análise estrutural do protótipo, recorreu-se a desenho computacional, tal como a definição da grelha estrutural reticulada, no entanto fez-se uso de um software especializado neste tipo de avaliações, o *Karamba3D*²², um *plug-in* do *Grasshopper*®. Este programa é capaz de analisar os comportamentos estruturais de geometrias tridimensionais quando aplicadas determinadas cargas sobre elas. Para essa análise o software trabalha com uma base de elementos simples, por isso a primeira tarefa que este executa é a tradução do objeto tridimensional para elementos vectoriais. Assim, a partir desse momento, é possível preencher os requisitos para a análise estrutural. Em primeiro lugar, é necessária a introdução das propriedades mecânicas do material em questão, a cerâmica. De seguida, deve-se definir a posição dos suportes e as suas condições, através da identificação de pontos no modelo tridimensional, e finalmente, definir a carga a considerar e os respetivos pontos de descarga (*Figuras 3.6.a. e 3.6.b.*). No caso da presente investigação considerou-se a carga máxima de uma tonelada para se executar a análise estrutural.



8.72e-01
stress [kN/cm²]
-1.14e+00



9.69e-03
displacement [cm]
0.00e+00



Figura 3.6.a. - Componentes do plug-in Karamba3D, que definem o processo de análise estrutural.

Figura 3.6.b. - Conversão do objeto tridimensional para desenho vectorial, identificando a grelha reticulada, os pontos de suporte e descarga.

Figura 3.6.c. - Gráfico de análise do esforço axial da coluna.

Figura 3.6.d. - Gráfico de análise da deformação axial da coluna.

A partir da construção deste modelo estrutural e da sua análise, conseguimos obter dois tipos de resultados. Como pretendido, em forma de valor numérico, conseguimos aferir a massa total da estrutura que foi analisada, assim como a dimensão das suas deformações. Esta informação é então complementada por elementos visuais que ilustram o esforço axial (*Figura 3.6.c.*) presente na estrutura, e de que forma as deformações são introduzidas no seu desenho inicial (*Figura 3.6.d.*). Assim, conseguimos ter um maior entendimento acerca do comportamento estrutural de uma determinada coluna, possibilitando uma comparação mais detalhada entre várias soluções, facilitando a seleção de um protótipo final.

3.7. Otimização Estrutural

23 - Ver <https://www.food4rhino.com/app/octopus>

Após a construção do modelo estrutural e respectiva análise, pôde-se iniciar o processo de otimização do sistema de colunas. No entanto, antes de se delinear estratégias é importante perceber o que é este conceito de otimização estrutural e como funciona.

Existem vários processos que podem ser usados para executar operações de otimização estrutural. No contexto do nosso trabalho o primeiro a ser explorado foi o método de análise de elementos finitos. De uma forma simples, este processo é um procedimento que, recorrendo a algoritmos matemáticos, define a distribuição mais adequada de um determinado material de uma estrutura, quando sobre um conjunto de cargas e condições (Reddy, 2005). No entanto, esta abordagem gerou alguns problemas, porque recorre a uma análise de volumes sólidos, e com base nisso, faz a distribuição do material. Isto significa então, que não há controlo nenhum sobre o desenho da grelha estrutural, pois a coluna teria de ser avaliada como um componente sólido. Por isso, através deste método voltávamos aos problemas iniciais da definição do sistema, que tornavam impossível o fabrico aditivo em cerâmica.

Assim sendo, optou-se por uma estratégia diferente. Com o objetivo de privilegiar o controlo sobre o desenvolvimento do desenho da grelha estrutural reticulada, aplicaram-se princípios evolutivos ao desenho computacional. Esta abordagem torna-se possível recorrendo a um novo *plug-in* para o *Grasshopper*®, o *Octopus*®²³. Este software, integrado ao desenho computacional, permite analisar um conjunto de parâmetros, ou genes, procurando cumprir múltiplos objetivos, numa tentativa de gerar uma série de soluções otimizadas entre os máximos de cada um dos objetivos introduzidos.

Os parâmetros introduzidos no *Octopus*®, que definem o sistema de colunas, são todos aqueles que contribuem para desenvolver o desenho do mesmo, começando pela forma da base, que irá definir a volumetria geral da coluna. De seguida, a quantidade de divisões horizontais e verticais, que irá determinar não só a quantidade de nós e elementos tubulares que a coluna irá ter, mas também o quão permeável ela é. Com o objetivo de desenhar elementos mais orgânicos e fluídos, a variação da secção ao longo da coluna e a introdução de rotações nessas secções, representam também parâmetros a ter em conta na

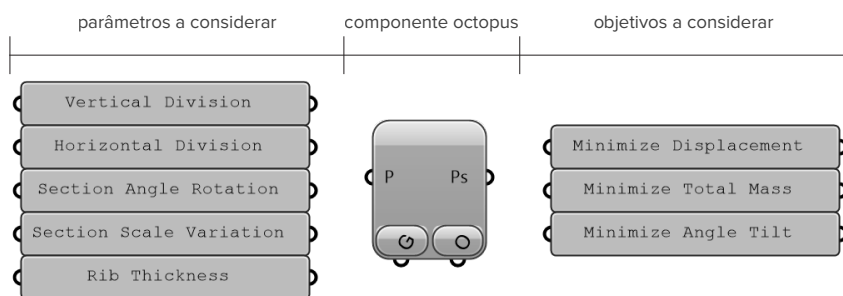


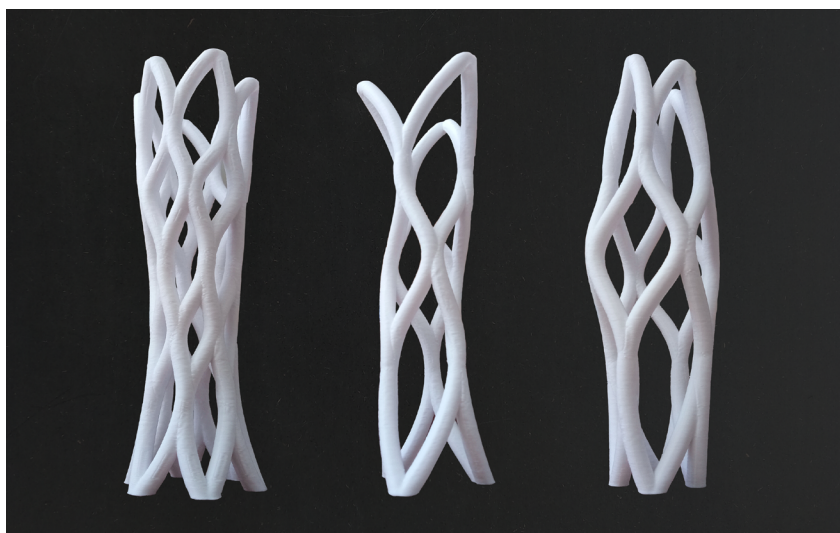
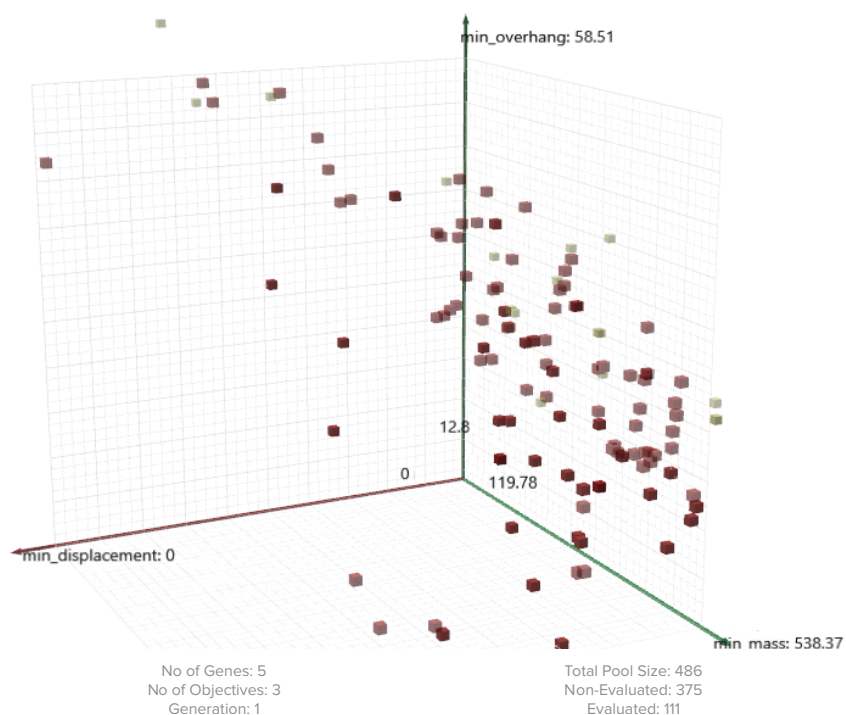
Figura 3.7.a. - Componentes do plug-in Octopus, que definem otimização estrutural.

Figura 3.7.b. - Gráfico de nuvem de pontos, mostrando as várias soluções analisadas, proveniente do software Octopus.

Figura 3.7.c. - Solução A impressa - Fotografia do protótipo.

Figura 3.7.d. - Solução B impressa - Fotografia do protótipo.

Figura 3.7.e. - Solução C impressa - Fotografia do protótipo.



otimização estrutural. Estes irão influenciar diretamente as inclinações das nervuras da coluna. Finalmente, no que aos genes diz respeito, o último a considerar é a própria espessura dos elementos tubulares, influenciando não só a permeabilidade da estrutura, mas também relacionando-se diretamente com o peso total dela.

Com os parâmetros a considerar estabelecidos, a próxima etapa passou pela definição dos objetivos que iriam servir como referência para a otimização. Eles são provenientes da análise estrutural e como já mencionado procuram minimizar o peso total e as deformações da estrutura. Contudo, visto estarmos a lidar com o processo de fabrico aditivo cerâmico através de LDM, implementou-se um terceiro objetivo, a minimização das amplitudes das inclinações das nervuras. Sendo um dos problemas deste processo, a fraca capacidade de fabricar objetos com fortes inclinações, este objetivo permite, no processo de comparação das várias soluções geradas pelo software, descartar qualquer solução que apresente inclinações superiores a 30°, garantindo a viabilidade de produção do protótipo (*Figura 3.7.a.*).

Após estabelecido o modelo, através da introdução dos parâmetros e objetivos, executou-se a otimização. Daqui resultou um gráfico de nuvem de pontos (*Figura 3.7.b.*), neste caso com três extremos, os objetivos. Como se pretendia minimizar todas as condições, as soluções que apresentam os melhores resultados seriam aquelas que se encontrassem mais próximas da origem. Contudo, de forma a agilizar o processo de seleção e comparação das colunas, foi necessária uma interpretação dos resultados. Ou seja, recorrendo ao gráfico, no eixo que ilustra o valor das inclinações, encontrou-se o valor de 30°, e apenas se considerou as soluções abaixo desse limite, pois o restante não eram soluções viáveis para fabrico aditivo cerâmico.

Ao todo foram geradas 486 soluções, das quais apenas 111 foram analisadas pelo *Octopus®*, pois as restantes não apresentavam viabilidade estrutural. Do grupo de soluções que foram analisadas, apenas 11 cumpriam a restrição imposta pelo processo de fabrico e só essas foram comparadas entre elas. Estas soluções apresentavam características bastantes semelhantes entre elas, no entanto foi possível identificar 3 tipos de solução. Uma primeira com uma base triangular, uma segunda de base quadrangular e finalmente, uma terceira de base hexagonal, das quais se aferiu as que apresentavam melhor comportamento estrutural (*Figura 3.7.c.*).

3.8. Definição de Protótipo a Produzir

Com o processo de definição da coluna e a sua respetiva análise e otimização estrutural, obteve-se um conjunto de possíveis soluções para o seu projeto, apresentando todas elas comportamentos estruturais satisfatórios. Com o intuito de desenvolver um protótipo de maior escala, foi necessário escolher uma das soluções de modo a iniciarmos o processo de fabrico, focando-nos na caracterização dos problemas que decorrem deste processo, e na subsequente proposta de soluções para os mesmos.

Neste processo de seleção socorremo-nos novamente do *plug-in Karamba3D®*, uma ferramenta já utilizada no decorrer desta investigação, para que através de uma análise dos comportamentos estruturais obtidos em cada uma das soluções, se estabelecesse uma comparação de fácil compreensão. Assim, recorreu-se não só aos resultados de valor numérico, que permitem aferir o peso, as deformações e o grau de inclinação das nervuras de uma forma mais precisa, mas também se fez uso dos seus elementos visuais, para verificar onde era concentrado o esforço axial e as deformações de cada uma das colunas.

Neste processo de comparação e seleção consideraram-se dois parâmetros. Um primeiro, mais objetivo, com base nos resultados dos comportamentos estruturais de cada uma das colunas e um segundo, mais subjetivo, relativo ao desenho das mesmas. Ao processo de definição de objetos arquitetónicos está sempre implícito o controlo e definição da morfologia e proporções desses objetos, pelo que essa análise também pesou na seleção do protótipo.

A seleção começou com uma comparação dos resultados estruturais das três colunas, que logo à partida originou a remoção da solução B das opções. Com a escolha a ser dividida entre as outras duas soluções, a opção acabou por recair sobre a solução A. Entre as três hipóteses, esta é a que apresenta não só melhores resultados a nível de deformação e esforço axial, mas também possui um desenho que formalmente nos interessou experimentar porque, das três soluções, é a que apresenta características similares ao tronco de uma planta *Ficus* (*Figura 3.8.a.*).



Peso

322 kg

Deformação

0.09 mm

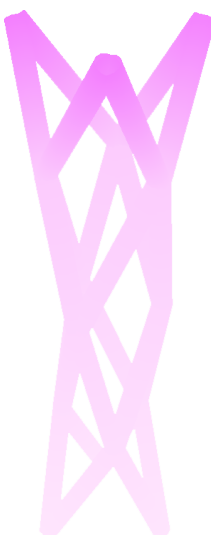
Inclinação

23°

Figura 3.8.a. - Solução A - Gráficos de análise do esforço e deformação axial e dados base da coluna.

Figura 3.8.b. - Solução B - Gráficos de análise do esforço e deformação axial e dados base da coluna.

Figura 3.8.c. - Solução C - Gráficos de análise do esforço e deformação axial e dados base da coluna.



Peso

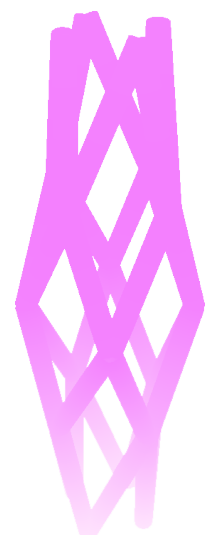
167 kg

Deformação

0,3 mm

Inclinação

26°



Peso

218 kg

Deformação

0,1 mm

Inclinação

27°

No que diz respeito à remoção da coluna B do grupo de hipóteses, essa opção foi tomada com base nos seus resultados estruturais. Apesar de, das três colunas, ser a mais leve, é também a que apresenta valores mais elevados de deformação e tem um fraco comportamento a nível de esforço axial (*Figura 3.8.b.*).

A coluna C, por sua vez, apresenta um comportamento estrutural similar à coluna A. Esta solução é também mais leve que a hipótese A, no entanto, isso representa também piores valores de deformação, ainda que ligeiros quando comparados à solução A. Das três, aparenta ser a que tem piores resultados relativamente a esforço axial (*Figura 3.8.c.*). Neste caso, como o comportamento estrutural era relativamente similar, a questão do desenho do protótipo foi também tida em conta. Assim, ainda que de uma forma subjetiva, a solução C foi colocada de parte, devido às suas características formais não se aproximarem daquelas presentes num tronco de uma planta Ficus.

4. Produção do Protótipo

24 - G-code é o nome dado à linguagem de Controlo Numérico Computorizado (CNC), genericamente usada no fabrico assistido por computador (CAM), para controlar máquinas automatizadas. (Schurig, 2015)

O presente capítulo debruça-se sobre todo o processo de fabrico do protótipo, e procura mostrar inicialmente, um trabalho concentrado na preparação do objeto tridimensional para fabrico aditivo cerâmico.

Assim, aqui pretende-se documentar não só o processo de geração do código que a impressora lê, designadamente o *g-code*²⁴, que possibilita a produção de objetos tridimensionais, — exposto em 4.1. *Tradução do Modelo Digital para Físico* — mas também a realização dos primeiros testes de impressão e a caracterização dos seus problemas — exposto em 4.2. *Testes Prévios e Problemas*. Numa fase seguinte, procura-se documentar também a otimização do processo de fabrico, — exposto em 4.3. *Otimização do Processo de Fabrico* — assim como o problema de retração cerâmica nas diferentes peças do protótipo.

Já numa fase mais avançada da investigação, o capítulo encerra com a produção da coluna, considerando dois cenários diferentes. Um primeiro cenário de produção através da divisão em partes do protótipo, — exposto em 4.4.1. *Fabrico em Partes e Através de Ligações Internas* e 4.4.2. *Encaixes* — considerando a existência de limitações no volume da impressora e a retração nas várias peças que o constroem. E um segundo cenário, onde essas limitações não estão presentes, produzindo a coluna numa só peça — exposto em 4.4.3. *Fabrico Através de Produção Contínua*.

4.1. Tradução do Modelo Digital para Físico

25 - Ver <http://www.ryanhoover.org/rd/xylinus.php>

26 - Software computacional, da qual o seu código fonte é disponibilizado publicamente, em que a sua licença permite estudar, modificar e distribuir o software por qualquer pessoa, sem qualquer custo. (Perens, 1999)

27 - Ver <https://lutum.vormvrij.nl/lutum-printer>

Quando se abordam questões de fabrico aditivo é importante perceber o processo por detrás do método e neste sentido é importante perceber que a linguagem do desenho digital e a linguagem que a impressora lê são diferentes. Por isso, é necessário traduzir a linguagem do objeto para a linguagem da impressora, designada por *g-code*. Existem diversos softwares capazes dessa tradução, no entanto optou-se por executá-la através de *Grasshopper*[®], permitindo não só personalizar o código, mas também desenvolvê-lo na mesma plataforma que o projeto, aproximando os estágios de concepção e construção, que são geralmente autônomos e distintos. (Carpo, 2013)

Para isso, tirou-se partido do *XYLinus*²⁵, um *plug-in* de código aberto²⁶, capaz de gerar *g-code* com base em geometrias desenhadas em *Rhinoceros 3D*[®] ou *Grasshopper*[®] (Barbosa & Figueiredo, 2016). Em primeiro lugar precisamos definir as geometrias que se pretendem produzir e de seguida estabelecer os parâmetros iniciais de extrusão, — a altura e espessura das camadas, assim como a velocidade de impressão — criando uma sequência de secções nas geometrias. Finalmente, introduzimos estas informações no *plug-in* e através dele obtemos o código que permite a impressora executar as funções necessárias para realizar a produção do objeto (*Figura 4.1.a.*).

Com o entendimento deste processo, foi então possível começar a pensar no fabrico do protótipo. Para se iniciarem os primeiros testes selecionou-se metade da coluna e dividiu-se em três partes, para não só se aferir os parâmetros base de extrusão, mas também se começarem a perceber os eventuais problemas da mesma. Feito isto, pôde-se executar o *g-code* de cada peça (*Figura 4.1.b.*).

Relativamente ao processo de fabrico, a coluna foi desenvolvida no *ACLab*, sediado no instituto de Design de Produto de Guimarães, recorrendo à impressora *Lutum 2.0* da *VormVrij*²⁷, para a produção das várias peças que constroem a coluna. Já num momento mais avançado da investigação, usou-se a impressora *Lutum 4.0*, que devido ao seu volume permitiu a realização de testes de produção continua, ou seja, numa só peça, também à escala 1:5 (*Figura 4.1.c.*). Em termos de dimensão dos protótipos, decidiu-se optar pela escala 1:5, não só devido às limitações volumétricas das impressoras, mas também por ser uma escala que apresenta tempos de fabrico relativamente rápidos.

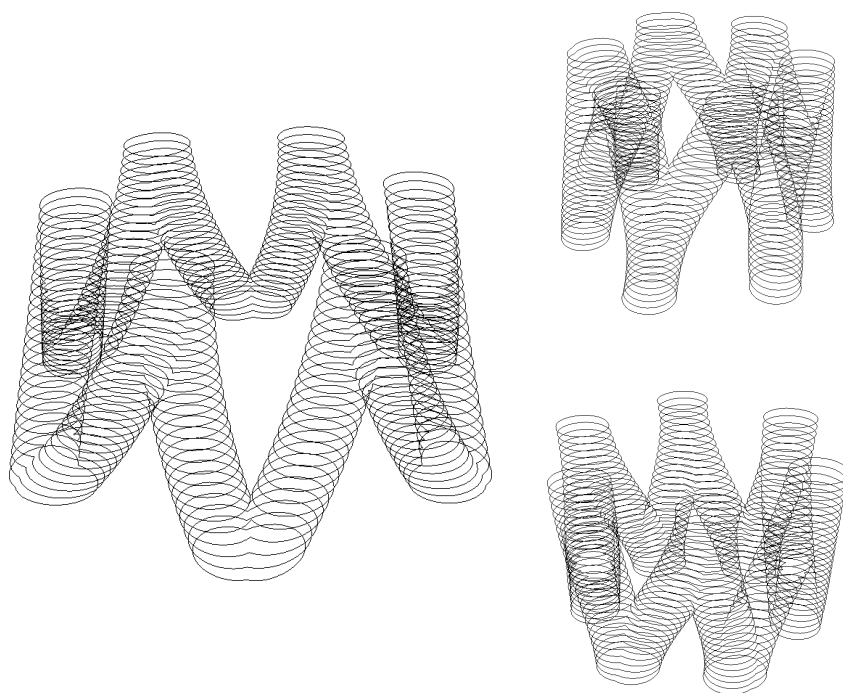
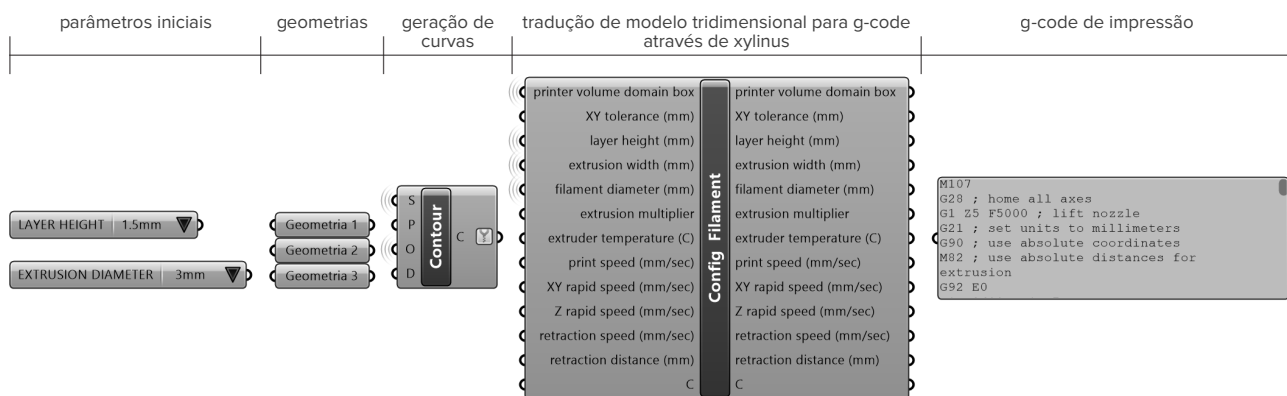
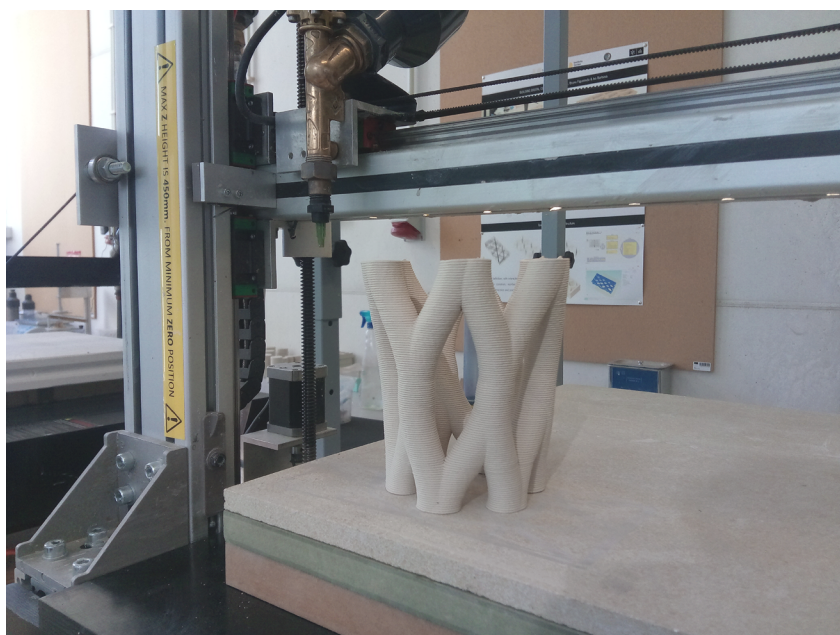


Figura 4.1.a. - Componentes do plug-in XYLinus, que definem a conversão para g-code.

Figura 4.1.b. - Desenho vectorial das três peças consideradas para os testes prévios.

Figura 4.1.c. - Impressora Lutum 2.0 - Fotografia do local de trabalho.



4.2. Testes Prévios e Problemas

Os primeiros testes, apesar dos seus problemas, representam um momento de satisfação, pois finalmente temos a possibilidade de ver algo que desenhamos a ser materializado.

Contudo, a verdade é que os primeiros testes revelaram-se insatisfatórios. As peças impressas apresentavam superfícies exteriores com irregularidades e com muitas imperfeições. No entanto, o primeiro teste não se focou nesse problema. O objetivo deste primeiro teste era encontrar as características mais adequadas para uma produção à escala 1:5, para que depois estas pudessem ser escaladas para uma produção à escala 1:2 ou até mesmo para a escala 1:1. Ou seja, este primeiro teste procurou estabelecer os parâmetros base ideais, no que diz respeito à altura e à espessura, em milímetros, das camadas que definem as peças.

No que diz respeito à altura da camada, testaram-se dois valores: de 1 mm, correspondente ao mínimo com que a impressora consegue trabalhar e 1,5 mm. Não se testaram mais valores para as alturas, pois algo superior a 1,5 mm, à escala 1:5, resultaria em dificuldades na produção de superfícies com ângulos mais abertos, como por exemplo a queda do objeto sobre si mesmo.

No caso da camada de 1 mm de altura, o resultado final do protótipo mostra de facto um grande nível de qualidade e detalhe do acabamento. No entanto, o tempo de produção aumentava para proporções que inviabilizavam esta opção, pois com esta hipótese, o fabrico de cada peça demoraria cerca de duas horas, por oposição à camada de 1,5 mm de altura, que demoraria entre 40 a 60 minutos. Assim, para tornar os tempos de produção mais razoáveis, contudo não prejudicando a qualidade do processo de fabrico da coluna, optou-se por uma altura de camada de 1,5 milímetros (*Figuras 4.2.a. e 4.2.b.*).

Com base nas diferentes pontas extrusoras disponíveis para as impressoras *Lutum 2.0* e *4.0*, testaram-se duas espessuras para as camadas, 3 mm e 6 mm. Optou-se por excluir à partida a espessura de 8 mm, pois esta significava, que não só as nervuras iriam ficar completamente sólidas, aumentando significativamente o peso do protótipo, mas também iria danificar o aspeto geral da coluna, pois resultava numa textura rude na sua superfície. Após executados os testes, definiu-se que a espessura da



Figura 4.2.a. - Teste 1 - Impressão 1.

Figura 4.2.b. - Teste 1 - Impressão 2.

Figura 4.2.c. - Teste 1 - Impressão 3.



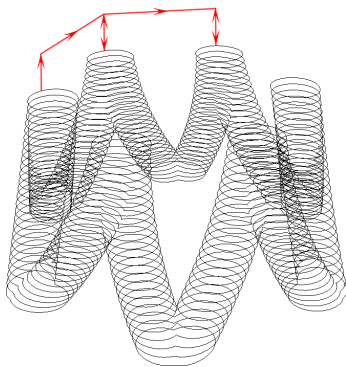
camada iria ficar nos 3 mm, visto que a de 6 mm apresentava problemas similares à de 8 mm (*Figuras 4.2.a. e 4.2.c.*).

Obviamente a espessura da camada afeta diretamente o desempenho estrutural da coluna, pois esta representa a espessura dos elementos tubulares. Por este motivo, após definir que se iria usar a espessura de 3 mm, os valores foram alterados no *Grasshopper*®. Esta alteração considerou a diferença de escala entre desenho computacional e o protótipo impresso, visto se estar a produzir à escala 1:5 e o desenho ser desenvolvido à escala real.

Assim, com este teste foi possível experimentar algumas hipóteses, que permitiram identificar e estabelecer os parâmetros base para a produção de uma coluna à escala 1:5. Com base nestes valores é nos possível executar o processo de fabrico a diferentes escalas, alterando as dimensões de espessura e altura de camada, para produzir colunas com as mesmas características formais.

4.3. Otimização do Processo de Fabrico

Figura 4.3.a. - Esquema vectorial da otimização introduzida.



Como referido anteriormente, os primeiros testes de produção não apresentaram resultados satisfatórios e após os parâmetros de extrusão serem definidos, o próximo passo foi reestruturar o código de impressão, ou *g-code*, para obter resultados mais “limpos” e de melhor qualidade.

O problema nos testes anteriores residia no facto de a ponta extrusora, após finalizar uma parte do desenho e começar a seguinte, arrastava sempre uma pequena quantidade de material que ficava depositada na superfície exterior do objeto. Isto resultava numa peça com excesso de material depositado em algumas das superfícies e cheia de imperfeições. Assim, para tentar evitar que a ponta extrusora arrastasse material, ao longo do percurso que define o desenho do protótipo, gerou-se, no código de impressão, uma simples subida no eixo Z, sempre que uma determinada parte do trajeto de impressão estivesse terminada (*Figura 4.3.a.*). Assim, nesses momentos, a ponta extrusora parava de extrudir material, subia no eixo Z, deslocava-se para o próximo local de desenho, descia e continuava a extrusão e assim sucessivamente até finalizar o processo de fabrico.

Num primeiro teste, definiu-se uma subida no eixo Z de 3 mm, altura suficiente para a resolução do problema em algumas situações porém, noutras o arrastamento de material continuava a estar presente (*Figuras 4.3.b. a 4.3.d.*). Isto acontece, em grande parte, devido a uma variação da consistência das pastas cerâmicas usadas. Esta variação geralmente não condiciona o processo de fabrico, no entanto, neste caso específico, devido à subida no eixo Z, que tenta quebrar a pasta, para que a ponta extrusora não arraste material, é importante que a consistência seja o mais uniforme possível.

Quanto mais seca a pasta, mais fácil é a quebra do material, no entanto o índice de humidade tem de ser alto o suficiente, geralmente entre 30% a 35% (Figueiredo *et al*, 2017), para que a camada superior adira à camada inferior. Contudo, o processo de preparação da pasta cerâmica não é um procedimento completamente exato, logo existe sempre a possibilidade de uma pasta resultar mais húmida que outra. Consequentemente, isso observa-se durante o processo de fabrico.

Existem outros fatores a ter em conta como a temperatura ambiente, velocidade de extrusão e o próprio percurso da ponta



Figura 4.3.b. - Teste 2 - Subida em Z 3mm - Impressão 1.

Figura 4.3.c. - Teste 2 - Subida em Z 3mm - Impressão 2.

Figura 4.3.d. - Teste 2 - Subida em Z 3mm - Impressão 3.



Figura 4.3.e. - Comparação do antes (acima) e depois (abaixo) da otimização.



extrusora, no entanto estes dois fatores não se alteraram ao longo dos vários testes, logo presumiu-se que uma variação na consistência da pasta cerâmica seria a causa do problema.

Neste contexto, para garantir que a subida da ponta extrusora quebrava a ligação de material e assim não o arrastava, considerando pasta com ligeiras diferenças no teor de humidade, criou-se um aumento à subida no eixo Z, de 3 mm para 5 mm. Atualmente, é muito difícil, quase impossível, obter uma pasta cerâmica sempre com a mesma consistência. O processo de preparação da pasta, por ser um procedimento manual, irá criar sempre uma margem para resultados diferentes. Neste caso específico, com a subida da ponta extrusora no eixo Z, ainda que sejam mínimas, essas diferenças podem resultar em impressões malsucedidas.

Assim, com estas alterações implementadas, começaram a surgir resultados que apresentavam bons níveis de qualidade (*Figuras 4.3.e. a 4.3.h.*), e visto que se tinham produzido peças sequenciais da coluna foi possível já nesta fase executar um primeiro teste de ligação entre as três peças da coluna (*Figura 4.3.i.*). Este teste, baseou-se numa rápida montagem das peças, com o objetivo de visualizar os momentos de ligação e assim, ter uma primeira noção das problemáticas criadas pela retração do material cerâmico no futuro desenvolvimento da investigação.



Figura 4.3.f. - Teste 3 - Subida em Z 5mm - Impressão 1.

Figura 4.3.g. - Teste 3 - Subida em Z 5mm - Impressão 2.

Figura 4.3.h. - Teste 3 - Subida em Z 5mm - Impressão 3.



Figura 4.3.i. - Primeiro teste de montagem das peças.

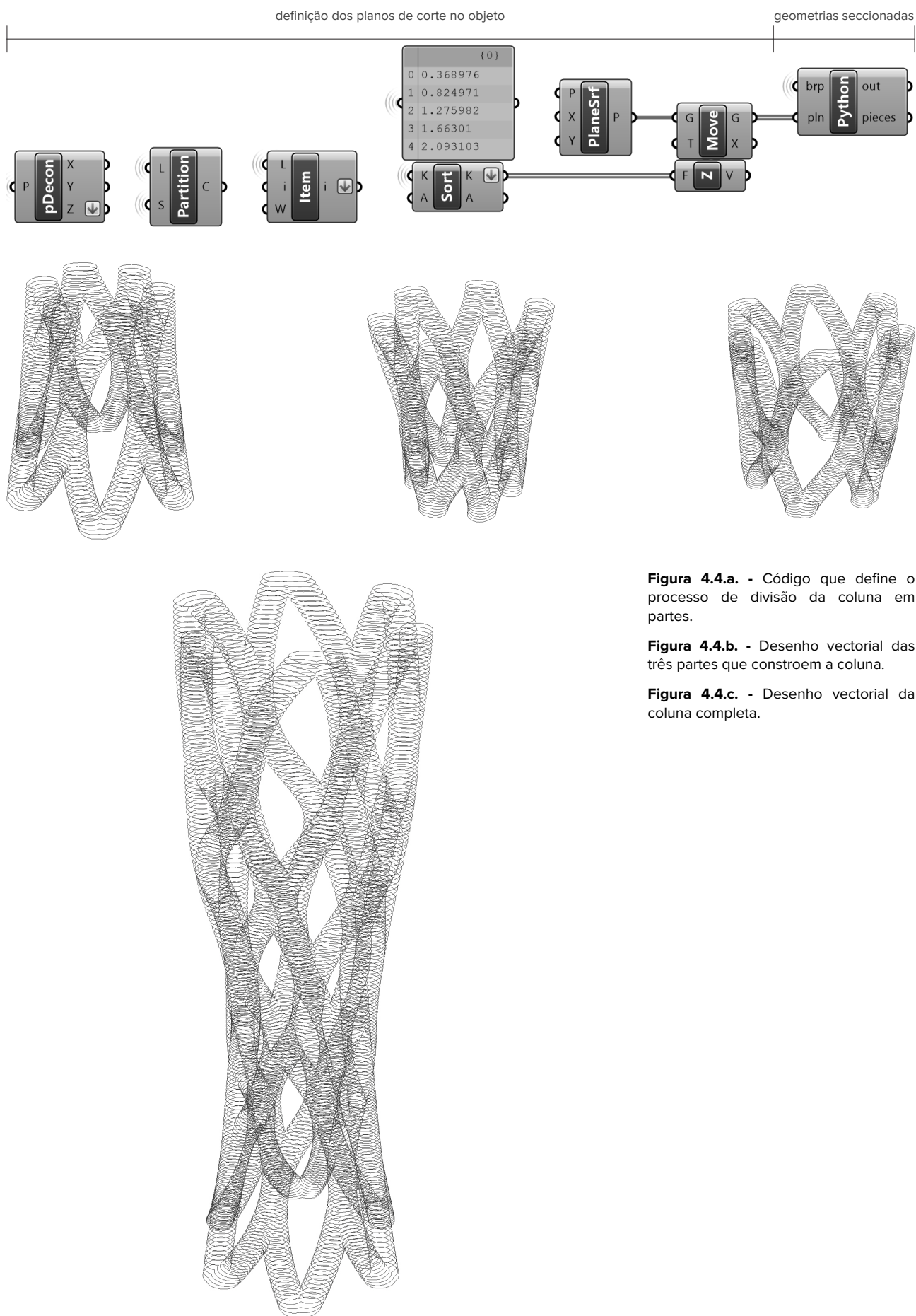


4.4. Preparação do Protótipo Final

Existe, com esta investigação, a ambição de fabricar um protótipo à escala real, e nesse contexto podemos ter duas abordagens no que diz respeito ao seu método de produção. Uma primeira abordagem que lida com impressoras com pequenos volumes, para produção de componentes estruturais, logo estes são divididos em partes, através de planos que seccionam a geometria (*Figura 4.4.a.*), e uma segunda abordagem, onde essas limitações são inexistentes, tornando assim possível o seu fabrico numa só peça.

O presente capítulo pretende analisar essas duas abordagens, considerando uma coluna de 80cm x 80cm x 250cm, produzida à escala 1:5, devido às limitações volumétricas das impressoras disponíveis no *ACLab*, e assim começa por estudar a produção do protótipo através da divisão em partes do mesmo e posterior montagem (*Figura 4.4.b.*). Aqui tenta-se, não só controlar a problemática da retração do material, visto anteriormente, mas agora documentando-se de uma forma mais pormenorizada. E também, explorar e testar o desenho dos próprios encaixes, usando de igual forma fabrico aditivo, designadamente fabrico aditivo de filamento polimérico.

Finalmente, encerra-se o capítulo com uma análise sobre a possibilidade e a viabilidade do fabrico contínuo (*Figura 4.4.c.*), numa só peça, do mesmo protótipo.



4.4.1. Fabrico em Partes e Através de Ligações Internas

O cenário de produção da coluna em partes e posterior montagem no local foi o primeiro a ser analisado e documentado, porque se entendeu ser a abordagem mais comum a utilizar para a produção de elementos estruturais arquitetónicos. Esta opção surge da dificuldade de não haver um fácil acesso a um sistema de produção com capacidades volumétricas suficientes para executar a produção de protótipos estruturais à escala real numa só peça. Portanto, entendida esta questão, começaram-se a delinear estratégias para executar divisões na coluna em componentes individuais, considerando as dimensões gerais das impressoras *Lutum 2.0* e *4.0* disponíveis no *ACLab*.

No início deste processo de divisão procurou-se que esta criasse peças que maximizassem o volume da impressora. No entanto, isto revelou-se problemático, porque uma divisão aleatória na coluna gerava momentos em que as nervuras não se intersectavam umas com as outras, criando assim pequenos elementos individuais desconectados do resto da peça. Isto complicava o processo de fabrico do protótipo, pois representava um aumento no número de peças a produzir e consequentemente complicava o processo de montagem, pois aumentava a margem para erros nas ligações das várias peças da coluna.

Desta feita, para simplificar os dois processos, estabeleceu-se que a quantidade de divisões verticais, um dos parâmetros que desenha a coluna, definido no início do código, iria ser igual ao número de divisões da própria coluna no processo de fabrico. Portanto, desta forma, apesar de não se utilizar o volume máximo de impressão, temos logo no início da definição do desenho da coluna, uma percepção de quantas peças a irão construir. Ao mesmo tempo, garante-se que não existem nervuras impressas individualmente, o que por sua vez facilita o processo de fabrico e montagem.

Delineada a estratégia de divisão da coluna, iniciou-se a produção das peças já com a noção dos problemas que se aproximavam. Uma das características a ter em conta, relativamente à cerâmica, é o processo de retração que se inicia na secagem e estabiliza após cozedura, como já observado nos testes prévios de algumas peças. Esta característica levanta algumas questões, principalmente ao nível das ligações das diferentes peças que constroem a coluna, em que



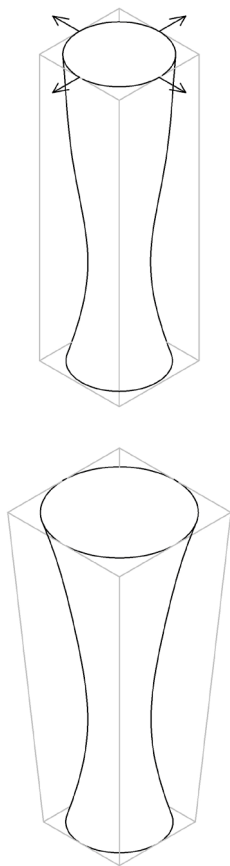
Figura 4.4.1.b. - Teste sem compensação
- Peça 1.

Figura 4.4.1.c. - Teste sem compensação
- Peça 2.

Figura 4.4.1.d. - Teste de montagem -
Sem compensação.



Figura 4.4.1.a. - Esquema da metodologia aplicada nas compensações.



o posicionamento do topo da peça inferior não coincide com a base da peça superior. Estas obrigatoriamente, depois da cozedura, tem de possuir uma dimensão que permita o seu encaixe.

Para retificar esta questão, propôs-se aplicar compensações dimensionais estratégicas no topo de cada uma das peças, considerando que estas iriam depois retrair para as dimensões desejadas, garantindo o encaixe das ligações (*Figura 4.4.1.a.*). Assim sendo, era necessário aferir os índices de retração, e em seguida introduzir dimensões corretas nas compensações das diferentes peças.

Em qualquer objeto simétrico a questão da retração é mais fácil de controlar, porque esta acontece de igual forma por todo o objeto. No entanto, na coluna, devido à sua complexidade, isto podia não acontecer. Apesar de haver uma percentagem base já conhecida referente aos índices de retração do material cerâmico, cerca de 15%, no caso da coluna, essa percentagem podia não ser igual.

Assim, para se perceber os índices de retração nos momentos de ligação das diferentes peças, produziram-se as três partes da coluna sem qualquer compensação. Após a cozedura das peças, foi então possível comparar as dimensões do objeto tridimensional com a peça produzida e assim aferir a percentagem de retração (*Figuras 4.4.1.b. a 4.4.1.g.*).

No que diz respeito a resultados, estes foram similares nas duas ligações, no entanto apresentaram uma característica que ainda não se tinha tido em conta. De facto, verificou-se uma retração de 15% no topo das peças, contudo o índice de retração nas bases foi bastante menor. Isto deve-se, em primeiro lugar, ao uso de uma placa refratária como base de impressão, cuja textura rugosa, cria atrito na superfície, fazendo com que a peça retraia menos no processo de secagem e cozedura. E em segundo lugar, o peso próprio do objeto, acentua a criação de atrito na superfície da base de impressão.

Portanto, verificou-se uma retração idêntica nos topos das três peças, no entanto a base da peça 2 apresentou um índice de retração de 8% e por sua vez a base da peça 3 um índice de 7%. É uma pequena diferença, contudo pode interferir na viabilidade dos encaixes das três peças (*Figuras 4.4.1.h. e 4.4.1.i.*).

Começando pela resolução da ligação entre a peça 1 e a peça 2, sabe-se com base na análise das retrações, que a dimensão final desta ligação é de 75,9 mm. Após se perceber os índices de retração de ambas as peças, gerou-se uma compensação no topo da peça 1, tendo em conta uma retração de 15%, para que depois de cozido, o topo da peça 1 tivesse a mesma dimensão da base da peça 2, permitindo a ligação entre as duas peças.

A dimensão para a compensação no topo da peça 1 foi encontrada, através de uma equação básica de regra três simples, em que se sabe que a medida da base da peça 2 equivale a 85% da dimensão pretendida, pois temos de considerar os 15% de retração verificados. Portanto, recorrendo à equação sabemos que a dimensão



Figura 4.4.1.e. - Teste sem compensação
- Peça 2.

Figura 4.4.1.f. - Teste sem compensação
- Peça 3.

Figura 4.4.1.g. - Teste de montagem -
Sem compensação.



pretendida é de 89,3 mm, isto é, a dimensão do topo da peça 1 terá de ser aumentada em 6,5 mm, para que quando cozida e a retração já tiver atuado, a dimensão diminua para os 75,9 mm, permitindo a ligação entre a peça 1 e 2 (*Figuras 4.4.1.j. a 4.4.1.m.*).

No que diz respeito à ligação de peça 2 e peça 3, o processo para definir a dimensão introduzida para compensar a retração do objeto foi exatamente o mesmo. Neste caso, sabendo que a dimensão final da base da peça 3 corresponde a 85% da dimensão pretendida, calculou-se que a dimensão do topo da peça 2 teria de alcançar os 134,9 mm. Ou seja, a compensação teria de ser de 11,6 mm para garantir a ligação entre a peça 2 e peça 3 (*Figuras 4.4.1.n. a 4.4.1.p.*).

Após se conhecerem os valores para as compensações, introduziram-se essas alterações no modelo computacional, através da manipulação das secções da coluna. Isto é, sendo a coluna definida por três divisões verticais e esse valor se refletir na quantidade de peças que a constroem, aumentou-se o diâmetro das secções que definem a superfície externa da coluna, para os valores referidos anteriormente, e assim com a retração estabelecida, foi possível interligar as peças e construir a coluna.

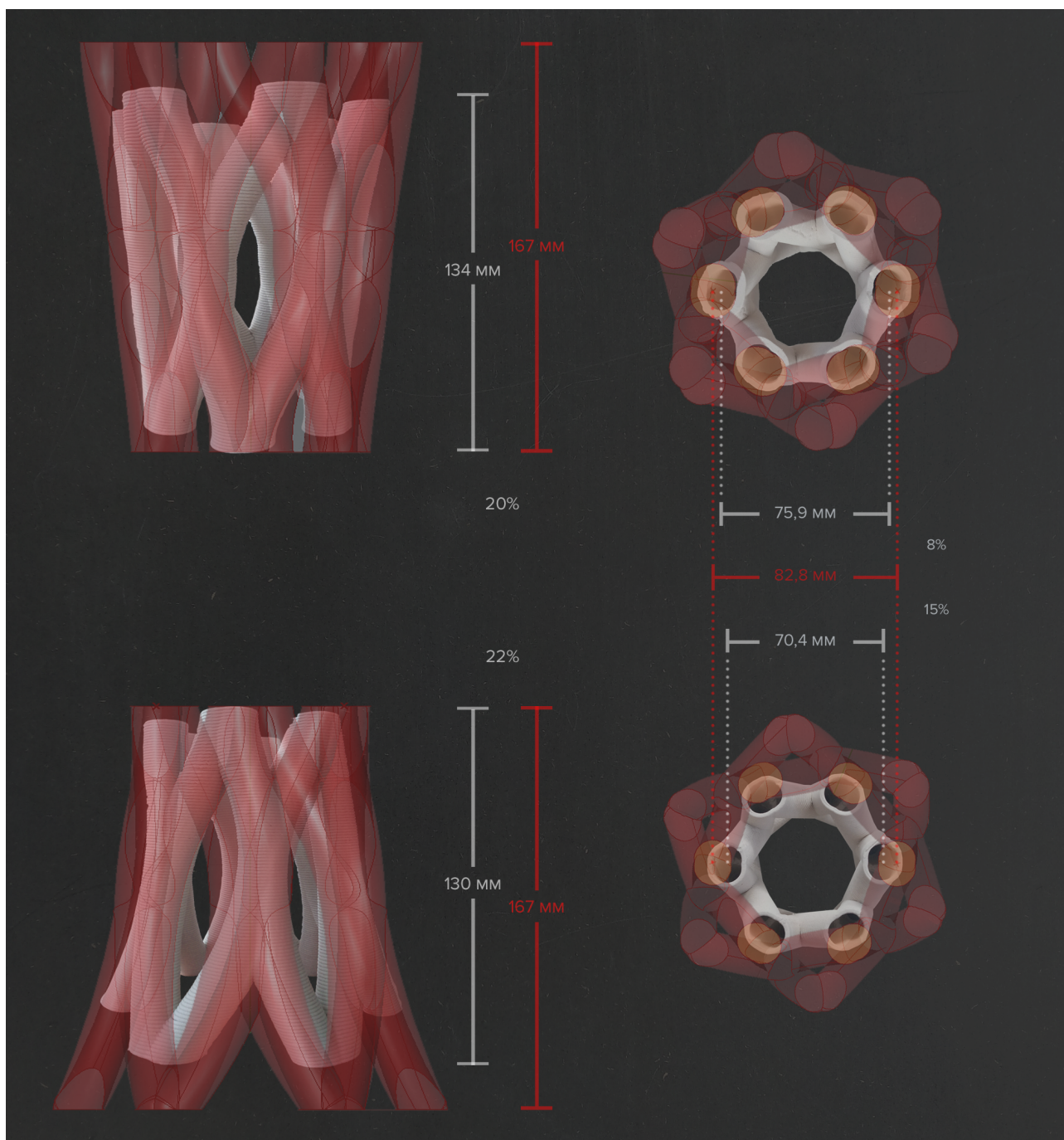


Figura 4.4.1.h. - Análise dos índices de retração das peças 1 e 2, onde a vermelho está representado o modelo digital e a branco o modelo impresso. À esquerda, vista lateral e à direita, vista de topo.

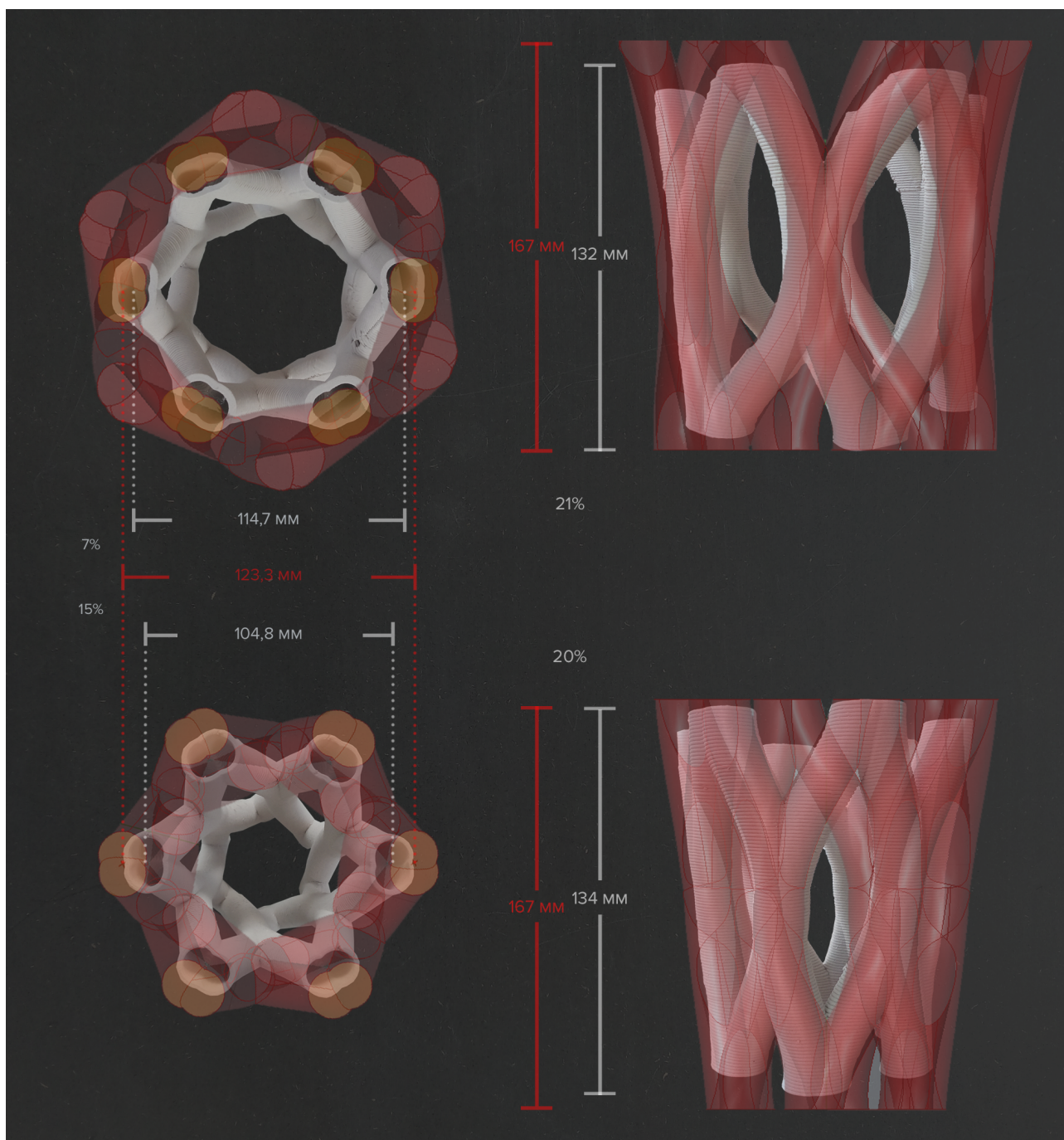


Figura 4.4.1.i. - Análise dos índices de retração das peças 2 e 3, onde a vermelho está representado o modelo digital e a branco o modelo impresso. À esquerda, vista de topo e à direita, vista lateral.



Figura 4.4.1.j. - Teste de compensação de 6,5mm - Peça 1.

Figura 4.4.1.l. - Teste de compensação de 6,5mm - Peça 2.

Figura 4.4.1.m. - Teste de montagem - Compensação 6,5mm.



Figura 4.4.1.n. - Teste de compensação de 11,6mm - Peça 2.

Figura 4.4.1.o. - Teste de compensação de 11,6mm - Peça 3.

Figura 4.4.1.p. - Teste de montagem - Compensação 11,6mm.



4.4.2. Encaixes

Figura 4.4.2.a. - Esquema tipo de encaixe macho/fêmea.

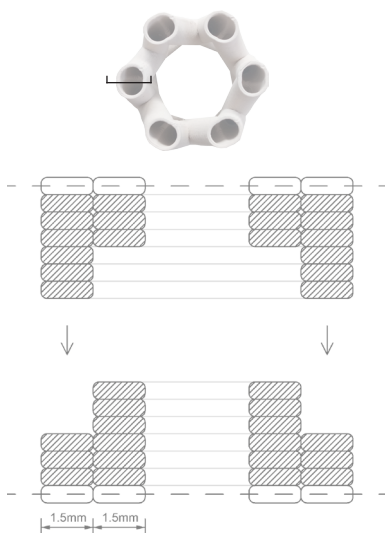
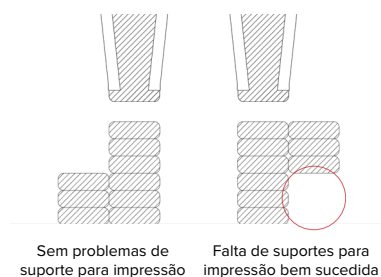


Figura 4.4.1.b. - Esquema expondo a impossibilidade de impressão devido à falta de suporte numa parte do objeto.



Após se estabelecer o controlo sobre o processo de fabrico, demonstrado no subcapítulo anterior, iniciou-se a definição dos elementos de encaixe entre as várias peças. Neste sentido, estabeleceu-se um sistema de fixação entre elas, garantindo uma maior estabilidade estrutural na coluna, nomeadamente a nível de deslocações laterais.

Inicialmente, estudou-se a possibilidade das próprias peças terem no seu desenho os encaixes através de um simples nó macho/fêmea. No entanto, rapidamente se percebeu que esta estratégia não era a mais adequada e iria levantar problemas durante o fabrico das peças. Este método definia-se pelo uso de duas espessuras durante o processo de produção, numa tentativa de desenhar o entalhe que compunha o encaixe (*Figura 4.4.2.a.*). Deste modo, procurou-se produzir a peça através de duas passagens, onde numa primeira, com 3 mm de espessura, se modela o objeto, e uma segunda, com 1,5 mm, se desenha o encaixe. Contudo, esta estratégia deu origem a um problema a ter em conta.

Através deste método iriam surgir momentos em que as camadas não tinham suporte para viabilizar o processo de fabrico. Os encaixes situados nos topos das peças não apresentavam dificuldades, pois haveria sempre suporte até ao fim da impressão. O problema residia nos encaixes situados na base das peças, pois eles não criavam suporte para as camadas superiores. Isto é, depois de produzido o encaixe na base, com 1,5 mm de espessura, a produção da peça iria continuar meio que no ar, visto se começar a usar 3 mm de espessura a partir daí (*Figura 4.4.2.b.*). No caso do fabrico aditivo cerâmico não podemos considerar a adição de suportes, como por exemplo é feito em processos de FFF de material polimérico, para ajudar a suportar a peça, pois nesta situação, mesmo que se reduza a espessura das camadas, os suportes e o protótipo vão-se unir, dificultando a sua remoção no fim da produção.

Neste sentido e com o objetivo de facilitar o processo de fabrico das peças cerâmicas optou-se então, por desenhar encaixes externos individuais para cada um dos nós em cada uma das peças. Relativamente ao seu desenho, estas peças são simples perfis tubulares com uma altura, que garanta que não haja deslocamentos laterais nas peças, e com uma aba lateral de 3 mm de espessura, tal como a espessura da peça, para fixar os encaixes nos nós (*Figuras 4.4.2.d. e 4.4.2.e.*). Como



Figura 4.4.2.c. - Encaixe A - Fotografia do objeto.

Figura 4.4.2.d. - Encaixe B - Fotografia do objeto.

Figura 4.4.2.e. - Esquema de montagem com encaixes - Fotografia do protótipo.



se pretende manter uma linguagem o mais uniforme e homogênea possível no exterior da coluna, estes encaixes são colocados no interior das nervuras (*Figura 4.4.2.f*).

É também importante referir que estes encaixes foram produzidos recorrendo também a métodos de fabrico aditivo, neste caso, recorreu-se a fabrico aditivo polimérico. Isto por causa do seu desenho, que requeria a adição de suportes, devido ao facto da aba lateral ser horizontal, e porque também ajudava a evitar o contacto entre duas superfícies cerâmicas, reduzindo assim o risco de quebra das peças do protótipo.

4.4.3. Fabrico Através de Produção Contínua

Apesar de não termos acesso a uma impressora de grande escala, não se descartou a possibilidade do fabrico do protótipo através de uma produção contínua.

No caso deste cenário, as questões de retração não são problemáticas principais, porque como se trata de uma peça só, durante o processo de secagem e cozedura, a retração vai acontecer, ainda que possivelmente de forma diferente ao longo da coluna, no entanto não irá afetar a construção da totalidade do protótipo. Ou seja, não vão surgir, à posteriori, problemas de ligação entre as peças.

Obviamente se considerarmos uma situação em que a coluna tem de ter uma dimensão exata, primeiramente terão de ser desenvolvidos testes para se averiguar a percentagem de retração. Isto porque, cada peça terá o seu índice de retração. Formas diferentes irão ter retrações diferentes, assim como peças com dimensões diferentes irão ter também retrações diferentes. No entanto, este cenário apresenta-se mais apelativo, pois não temos de lidar com todo o processo de pré e pós-produção, nomeadamente a divisão do protótipo em partes, possíveis compensações na sua dimensão, desenvolvimento de encaixes e montagem.

Apesar de não se poder testar este cenário em escala real, desenvolveu-se um teste à escala 1:5, tal como as peças do outro cenário (*Figura 4.4.3.a.*). Para isso recorreu-se à impressora *Lutum 4.0*, devido ao seu volume de impressão, que permitiu produzir a altura total do protótipo.

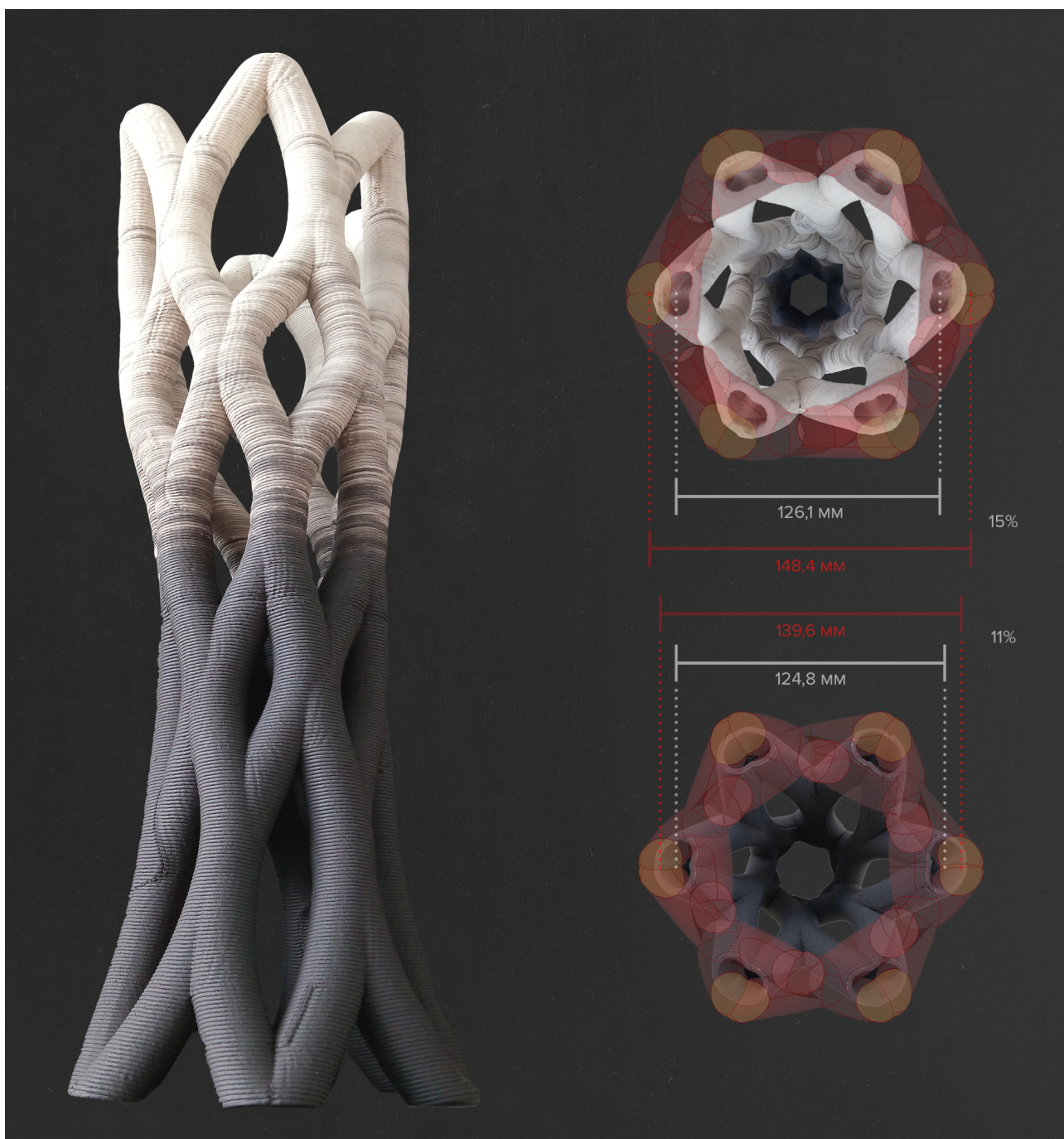


Figura 4.4.3.a. - Coluna impressa - Fotografia do protótipo - e análise do índice de retração da peça, onde a vermelho está representado o modelo digital e a branco o modelo impresso.

4.5. Análise dos Protótipos Finais

A exploração de dois cenários de produção permitiu, numa fase final da investigação, estabelecer uma comparação e consequente análise entre eles e assim observar certos aspectos em relação às dimensões finais dos protótipos (*Figura 4.5.a.*).

No que diz respeito às dimensões das bases e dos topos, estas partilham as mesmas características, apresentando índices de retração semelhantes nos dois cenários. No caso dos índices dos topos das peças, o valor de 15% de retração, é idêntico em todos os protótipos, já nas bases, é onde vemos maiores diferenças, com este valor a variar entre os 7% e os 11%. É no índice de retração da altura das peças que vemos maiores diferenças. Com base na altura do desenho digital da coluna, de 500 mm, à escala 1:5, observou-se que o protótipo produzido em partes, depois de cozido, apresentou um índice de retração de 21%, com uma dimensão final de 396 mm de altura. Por sua vez, o protótipo desenvolvido através de uma produção contínua apresentou um índice de retração de 17%, com uma dimensão final de 417 mm de altura.

Com estes resultados podemos observar que ambos os protótipos apresentam índices de retração consideráveis, principalmente se olharmos para as dimensões finais das alturas. Neste contexto, o fenómeno da retração parece afetar de igual forma os protótipos no eixo X e no eixo Y, apresentando valores semelhantes, no entanto o cenário é diferente se olharmos no eixo Z. Quando comparado com as dimensões da base e do topo, as dimensões das alturas foram as apresentaram alterações mais acentuadas, atingindo valores entre 5% a 10% mais altos.

Quando comparados os dois protótipos, os resultados foram diferentes ao que se pensava. Esperava-se ver uma maior retração da altura do protótipo produzido de forma contínua, devido ao facto de ele ser feito como uma peça única e ter mais peso próprio, que por consequência, no processo de secagem e cozedura, acentuaria a retração. Contudo, isso não se comprovou e observou-se que o protótipo produzido em partes foi o que apresentou uma maior retração na altura. Por ser produzido em peças, possivelmente faz com que haja mais superfícies expostas ao ar, afetando o processo de cura e consequentemente os valores de retração.



Figura 4.5.a. - Comparação e análise da retração das alturas da coluna impressa em partes (à esquerda) e contínua (à direita), com base na dimensão do desenho digital (traço vermelho).

5. Conclusão

O presente capítulo procura expor de forma sintética algumas considerações que se acreditam ser relevantes no contexto da investigação e que foram sendo levantadas durante o seu percurso. Simultaneamente, pretende-se com esta síntese demonstrar o conhecimento adquirido, dentro das temáticas propostas, e também mostrar as contribuições desta investigação para o seu desenvolvimento.

O fabrico aditivo aplicado à escala da arquitetura é uma temática que mostra um interesse crescente nestes últimos anos, no entanto o trabalho sobre ela já tem vindo a ser desenvolvido desde a década de 90. Neste contexto, é uma temática já com uma grande base de experimentação, que começou com uma lenta progressão, porém com o avanço tecnológico e um aumento no interesse por esta tecnologia, possibilitou grandes inovações na indústria.

Parte dessas inovações passaram pelo desenvolvimento e associação de novos materiais ao processo de fabrico aditivo. No caso da cerâmica, observou-se uma grande evolução na sua aplicabilidade em fabrico aditivo para a produção de componentes arquitetónicos. A ligação deste novo processo de fabrico com este material já estabelecido no meio da construção, possibilitou a exploração de novas finalidades e objetivos, devido às propriedades do material, foi possível explorar e criar novos e inovadores protótipos.

No entanto, quando abordamos fabrico aditivo cerâmico, sobretudo quando se trata do material sem compósitos, precisamos de ter em conta, no desenho de qualquer objeto, a dificuldade que este material demonstra para suportar inclinações com amplitudes superiores a 30°, em relação ao eixo Z. Assim sendo, para garantir impressões bem sucedidas e a viabilidade deste processo de fabrico, é importante ter controlo sobre todos os parâmetros que definem o desenho do objeto.

Uma outra questão levantada foi a viscosidade apresentada pelo material, que nos primeiros testes de impressão exibiu vários problemas. Devido a esta característica a ponta extrusora acumulava material e consequentemente arrastava-o durante o seu percurso, criando depósitos de material por todo o objeto. Com a alteração do *g-code* foi possível corrigir esses defeitos e obter impressões de boa qualidade.

Durante o processo de produção do protótipo final, através de uma abordagem que construía a coluna por partes, observou-se uma outra característica a ter em conta. O material cerâmico, após secagem e cozedura, apresenta índices de retração consideráveis que, no contexto desta investigação, afetaram as ligações entre as várias peças que constroem a coluna. Qualquer projeto que recorra a este processo de fabrico e tenha como premissa o uso de qualquer tipo de ligação, necessita ter em consideração os índices de retração para garantir a viabilidade das ligações. No caso do sistema de colunas explorado nesta investigação, que apresentava 15% de retração nos topos e variava entre 7% e 8% nas bases, a questão foi solucionada com a introdução de compensações estratégicas nos topos das peças.

No que à cerâmica diz respeito, levantou-se uma última consideração. A cerâmica é um material resistente, ou seja, suporta cargas elevadas à compressão, mas também é um material rígido, isto é, quebra facilmente. Sendo assim, durante a exploração dos encaixes para as diferentes peças do sistema de colunas, procurou-se que o seu desenho não só auxiliasse nas fixações das peças, reduzindo os movimentos transversais aplicados na coluna, mas também evitasse o contacto de duas superfícies cerâmicas, reduzindo o risco de fissurar ou até mesmo quebrar as peças.

Tal como este novo método de fabrico, a integração de desenho computacional e paramétrico em arquitetura, representa também uma mudança no processo de concepção e construção. A introdução deste tipo de ferramentas permite auxiliar e agilizar o desenvolvimento do projeto, procurando soluções que melhor respondam aos pressupostos previamente estabelecidos.

No contexto desta investigação, a associação de desenho computacional com princípios evolutivos genéticos permitiu, de uma forma simples e acessível, compreender e explorar a temática de otimização estrutural, que de outra forma se tornaria uma tarefa complexa e intrincada.

A estratégia aplicada para a otimização, apesar de simplificar o processo, não define uma solução única ótima para um determinado caso. Com recurso ao software *Octopus®*, foi possível identificar um conjunto de soluções otimizadas, das quais se pôde comparar e selecionar a que melhor responde ao problema apresentado.

Finalmente, o processo de desenho digital até ao objeto impresso não deve ser encarado como um procedimento linear. São dois estágios distintos que são desenvolvidos recorrendo a linguagens diferentes. Assim, há a necessidade de se executar uma tradução do desenho digital para uma linguagem que a máquina consiga ler. O recurso a desenho computacional, através de *Grasshopper®*, permite explorar uma liberdade que não era possível com outros softwares, por exemplo a nível de controlo do percurso da ponta extrusora.

5.1. Considerações Finais e Trabalhos Futuros

A presente investigação procurou abordar vários temas e explorar a produção de um protótipo de um componente arquitetónico, através de fabrico aditivo cerâmico, e com base nos pressupostos aqui estabelecidos, surgiram novas questões que poderiam contribuir num futuro desenvolvimento das temáticas aqui presentes.

Em primeiro lugar, visto se estar abordar questões de fabrico de componentes estruturais arquitetónicos, procurou-se desenvolver os protótipos a uma escala mais próxima possível do contexto real. A presente investigação documenta uma produção à escala 1:5, com o intuito de se perceber questões de retração e ligação entre peças, no entanto estes factores serão afetados também pela escala global da geometria. Neste sentido, com uma impressão à escala real, estas questões iriam representar problemas de outra magnitude. Já numa fase tardia da investigação e de forma superficial, explorou-se a impressão à escala 1:2, não sendo possível ir mais longe devido às limitações das impressoras presentes no laboratório, contudo estas situações aparentam ter índices de retração consideravelmente maiores, dificultando as ligações entre as várias peças.

Estes problemas levam-nos para uma segunda questão. Com fabrico aditivo cerâmico iremos sempre lidar com problemas de retração do material, por isso de maneira a controlar e prever os índices presentes numa dada geometria, cria-se a possibilidade de, através de desenho computacional, desenvolver um algoritmo que seja capaz de aferir as percentagens de retração presentes numa determinada geometria. Deste maneira, acaba-se com a necessidade de executar impressões prévias para aferir esses valores, permitindo passar diretamente do modelo digital para o protótipo final.

Finalmente, como a investigação se debruçou sobre a produção de componentes estruturais, surge a oportunidade de se testar a sua viabilidade no ambiente construído, recorrendo a testes de carga à compressão dos protótipo produzidos.

6. Bibliografia

AHMED, Zeeshan, BOS, Freek, WOLFS, Rob, SALET, Theo, (2016), “Design considerations due to scale effects in 3D concrete printing”, in *Proceedings of 8th International Conference of the Arab Society for Computer Aided Architectural Design*, ASCAAD 2016, London, pp. 115-124.

ALLNER, Lukas, KROEHNERT, Daniela, (2018), “Conceptual Joining: Branch Formations”, in *Proceedings of the IASS Symposium 2018*, Creativity in Structural Design, Boston, Caitlin Mueller.

BARBOSA, I., FIGUEIREDO, Bruno, (2016), “Optimized Brick – Print Optimization, Challenges for Technology Innovation: An Agenda for the Future”, in *Proceedings of the International Conference on Sustainable Smart Manufacturing (S2M 2016)*, Lisboa.

BARRIOS, Carlos, (2005), “Transformations on parametric design models: A case study on the sagrada familia columns”, in *Proceedings of the 11th International CAAD Futures Conference*, Computer Aided Architectural Design Futures 2005, pp. 393-400.

BENDSOE, Martin, SIGMUND, Ole, (2003), “Topology Optimization: Theory, Methods, and Applications”, Germany, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

BLOCK, Philippe, RIPPMANN, Matthias, VAN MELE, Tom, (2016), “Bottom-Up Performance for a New Form of Construction”, in *Architectural Design 87*, Beyond Bending, Venice Architecture Biennale, Venice, pp.104-109,

BRESEGHELLO, Luca, (2014), “A Performative Approach to 3D Printed Architecture”, Bachelor in Science of Architecture, Politecnico di Milano. Facoltà di Architettura e Società, Italy.

CARPO, Mario, (2013), “The Digital Turn in Architecture”, United Kingdom, John Wiley & Sons Ltd.

CARVALHO, João, (2018), “Cerâmica 3D: Sistemas digitais para a personalização do desenho e fabrico de componentes arquitetónicos”, Tese de Mestrado, Universidade do Minho, Portugal.

CRUZ, Paulo, KNAACK, Ulrich, FIGUEIREDO, Bruno, WITTE, Dennis, (2017), "Ceramic 3D Printing – The Future of Brick Architecture", in *IASS 2017, Interfaces: Architecture, Engineering, Science*, Germany.

FISCHER, Thomas, HERR, Christiane, (2016), "Parametric Customisation of a 3D Concrete Printed Pavilion", in *Proceedings of the 21st International Conference of the Association for Computer-Aided Architectural Design*, Rese, Living Systems and Micro-Utopias: Towards Continuous Designing, Australia.

GARCIA, Manuel, RETSIN, Gilles, (2015), "Design Methods for Large Scale Printing", in *Fabrication*, Volume 2, eCAADe 33, pp. 331-339.

JANSON, H.W., JANSON, Anthony, (1992), "Iniciação à História da Arte", Lisboa, Fundação Calouste Gulbenkian.

KHOSHNEVIS, Behrokh, (2004), "Automated construction by contour crafting — related robotics and information technologies", in *Automation in Construction* 13, Elsevier, pp. 5-19.

KIERAN, Stephen, TIMBERLAKE, James, (2004) "Refabricating Architecture", New York, Mc Graw Hill.

KOLAREVIC, Branko, (2003), "Architecture in the Digital Age, Design and Manufacturing", New York, Taylor & Francis.

LINDSEY, Bruce, (2001), "Digital Gehry: Material Resistance Digital Construction", Birkhäuser.

LÓPEZA, David López, VEENENDAALA, Diederik, AKBARZADEHA, Masoud, BLOCK, Philippe, (2014), "Prototype of an ultra-thin, concrete vaulted floor system", in *Proceedings of the IASS-SLTE 2014*, "Shells, Membranes and Spatial Structures: Footprints", Brazil.

MITCHELL, William, MCCULLOUGH, Malcolm, (1997), "Digital Design Media", New York, John Wiley & Sons, Inc.

MITCHELL, William J. (2001): "Roll Over Euclid: How Frank Gehry Designs and Builds" in Frank Gehry, Architect, New York, J. Fiona FAGHEB, Abrams.

PERENS, Bruce, (1999), "The Open Source Definition", in *Open Sources: Voices from the Open Source Revolution*, O'Reilly Media.

PETERS, Brian, (2013), "Building Bytes: 3D-Printed Bricks", in *Proceedings of the 33rd Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture (ACADIA)*, Ontario, P. Beesley, O. Khan, & M. Stacey, pp. 433-434.

REDDY, Junutula, (2006), "An Introduction to the Finite Element Method", 3rd ed., McGraw-Hill Education.

SABIN, Jenny, MILLER, Martin, CASSAB, Nicholas, LUCIA, Andrew, (2014), "PolyBrick: Variegated Additive Ceramic Component Manufacturing (ACCM)", in *3D Printing*, Volume 1, Mary Ann Liebert, pp. 78-84.

SCHIANO-PHAN, Rosa, (2004), "The Development of Passive Draught Evaporative Cooling Systems Using Porous Ceramic Evaporators and Their Application in Residential Buildings", in *The 21st Conference on Passive and Low Energy Architecture*, Netherlands.

SCHURIG, Fabian, (2015), "Slicing Algorithms for 3D-Printing", in *Proseminar H4ck3rs D311ght 2015*, Technical University of Munich, Munich.

SOUSA, José, OLIVEIRA, Rui, (2016), "Building Traditions with Digital Research - Reviewing the Brick Architecture of Raúl Hestnes Ferreira through Robotic Fabrication", in *The 34th eCAADe Conference, Complexity & Simplicity*, Finland, pp. 123-131.

VITRUVIUS, Marcos, (1st Century b.C.), "The Ten Books of Architecture", translated by Morris Hicky Morgan, London, Harvard University Press.

WITTE, Dennis, (2016), "Ceramics in an AM Process for the Building Industry", in *Imagine 10*, Rapids 2.0, Rotterdam, nai010 Publishers, pp. 74-78.

WOLFS, Rob, (2015), "3D Printing of Concrete Structures", Master of Architecture, Building and Planning, Eindhoven University of Technology, Netherlands.

ZHOU, Qiang, SHEN, Wei, WANG, Jin, ZHOU, Yi Yi, XIE, Yi Min, (2018), "Ameba: A new topology optimization tool for architectural design", in *Proceedings of the IASS Symposium 2018*, Creativity in Structural Design, Boston, Caitlin Mueller.

BARANYK, Isabella, (2017), "This Complex Concrete Column Was Made Using 3D-Printed Formwork", disponível em <https://www.archdaily.com/806230/this-complex-concrete-column-was-made-using-3d-printed-formwork>, consultado em Fevereiro de 2018.

CRAVEN, Jackie, (2017), "Find Out About the Tuscan Column - Roman Classical Architecture", disponível em <https://www.thoughtco.com/what-is-a-tuscan-column-177523>, consultado em Setembro de 2018.

ETHERINGTON. Rose, (2012), "Building Bytes 3D printed bricks by Brian Peters", disponível em <https://www.dezeen.com/2012/10/31/building-bytes-3d-printed-bricks-brian-peters>, consultado em Março de 2018.

FRATELLO, Virginia, RAEL, Ronald, (2015), "Cool Brick", disponível em <http://www.emergingobjects.com/2015/03/07/cool-brick/>, consultado em Outubro de 2018.

KOSLOW, Tyler. (2016), "World's First 3D Printed Pedestrian Bridge Completed in Madrid", disponível em <https://all3dp.com/3d-printed-pedestrian-bridge>, consultado em Março de 2018.

MORBY, Alice, (2016), "Amalgamma develops 3D printing concrete technique for building structures", disponível em <https://www.dezeen.com/2016/01/21/amalgamma-develops-3d-printing-concrete-technique-building-structures-bartlett>, consultado em Fevereiro de 2018.

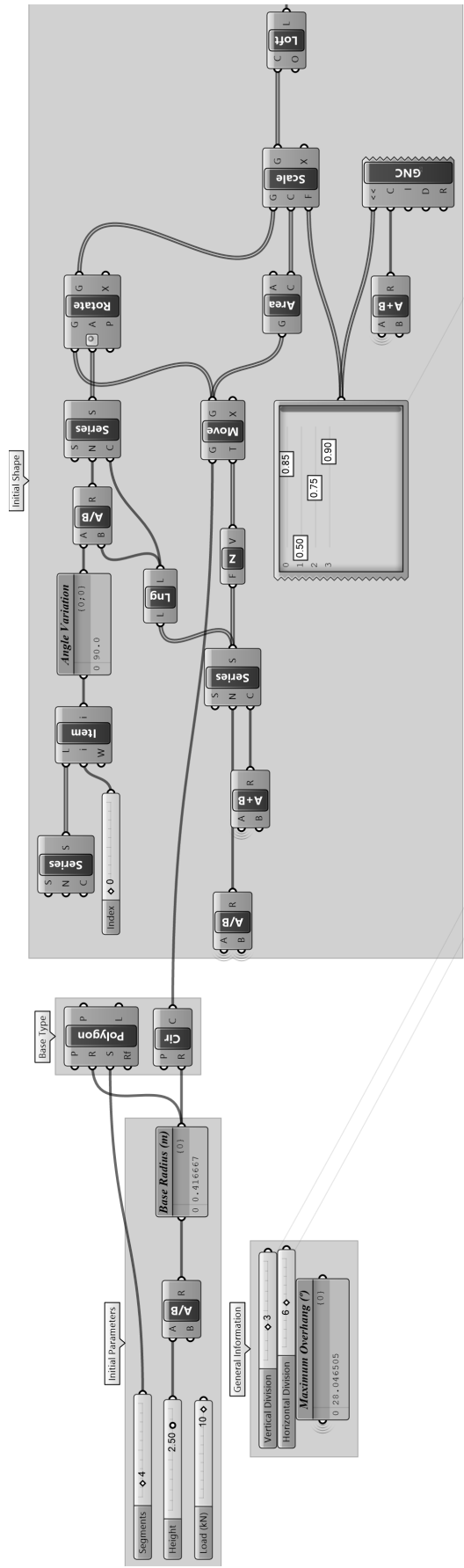
NOVIKOV, Petr, (2015), "Architectural robots: The shape of the robots that will shape your home", disponível em <https://robohub.org/architectural-robotics-shape-of-the-robots-that-will-shape-your-home-in-dom-reconfigurable-spaces>, consultado em Fevereiro de 2018.

RAVENSCHROFT, Tom, (2017), "The Race to Build the First 3D Printed House", disponível em <https://www.theb1m.com/video/the-race-to-build-the-first-3d-printed-house>, consultado em Fevereiro de 2018.

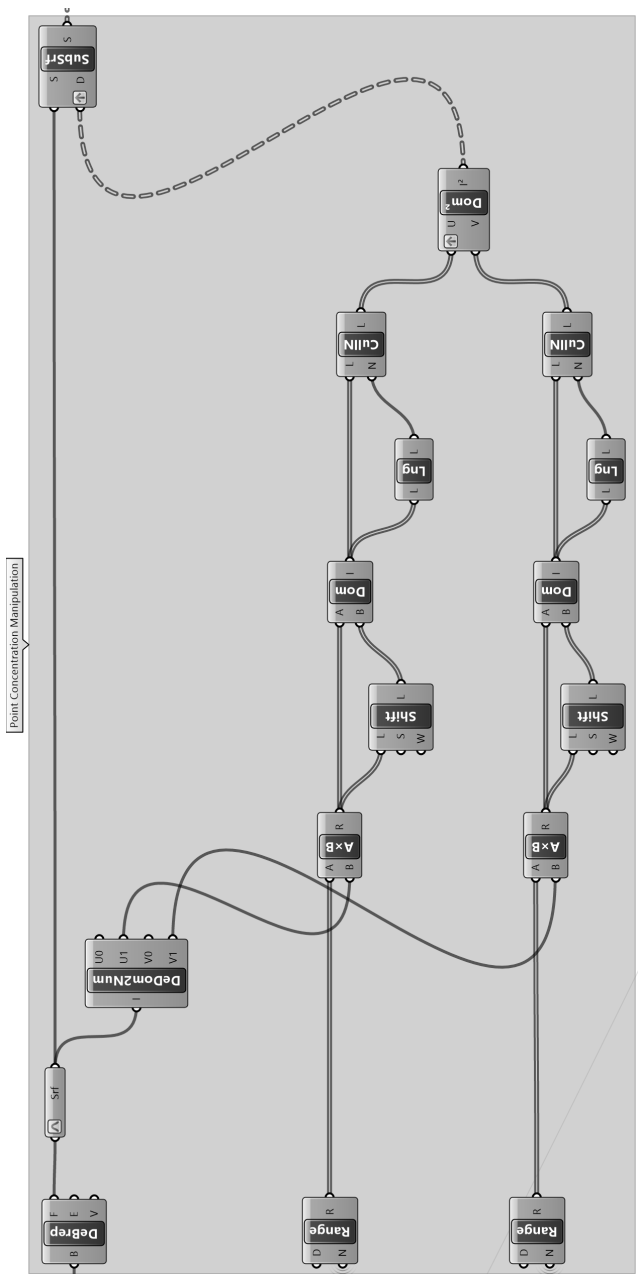
VALENCIA, Nicolás, (2017), "World's First 3D Printed Bridge Opens in Spain", disponível em <https://www.archdaily.com/804596/worlds-first-3d-printed-bridge-opens-in-spain>, consultado em Março de 2018.

7. Anexos

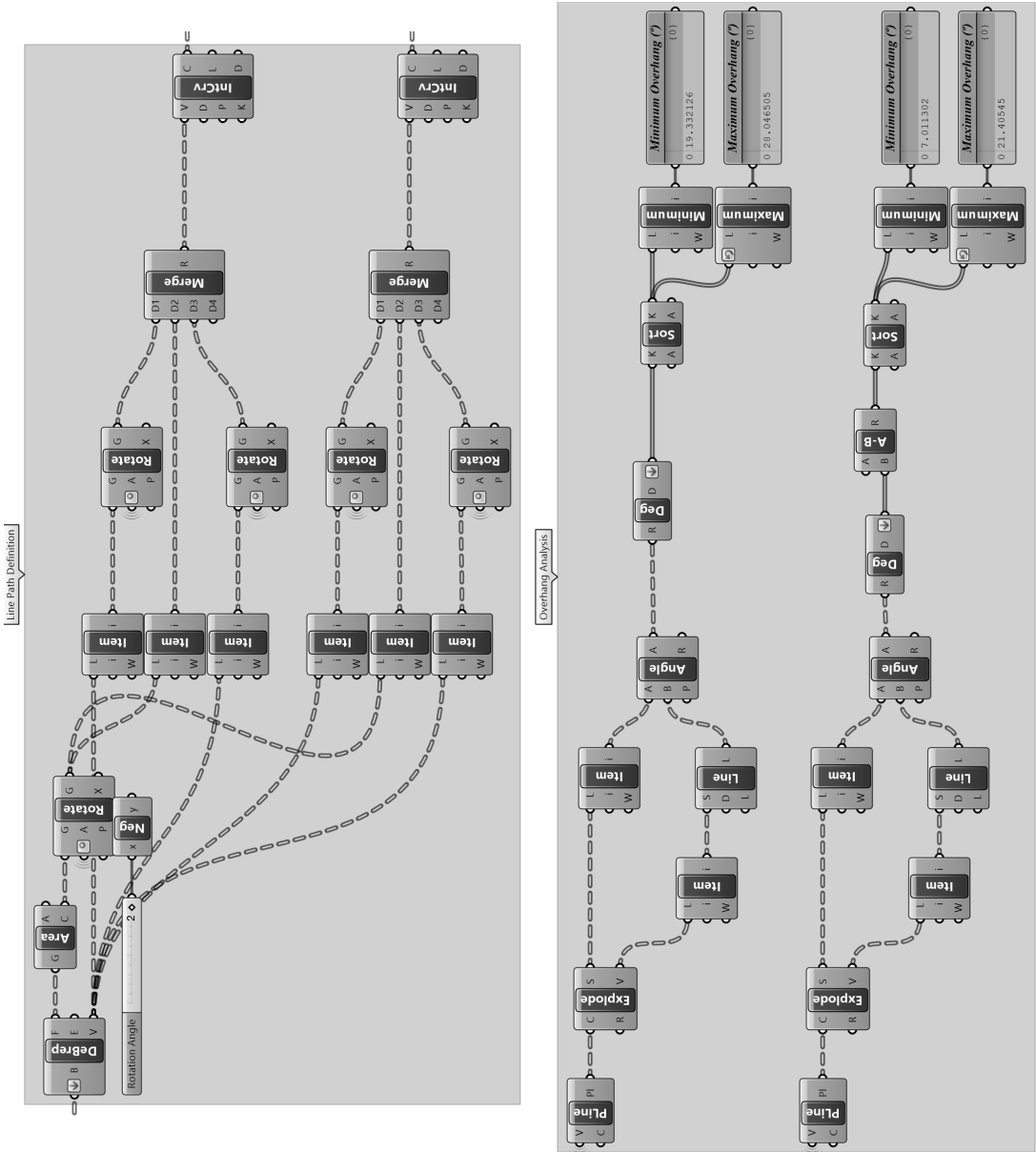
Anexo 1 - Modelo Computacional —
parte 1. Definição dos parâmetros
iniciais, modelação da geometria base,
introdução de variação de secção
e respetivas rotações e finalmente,
geração da superficial externa da coluna.



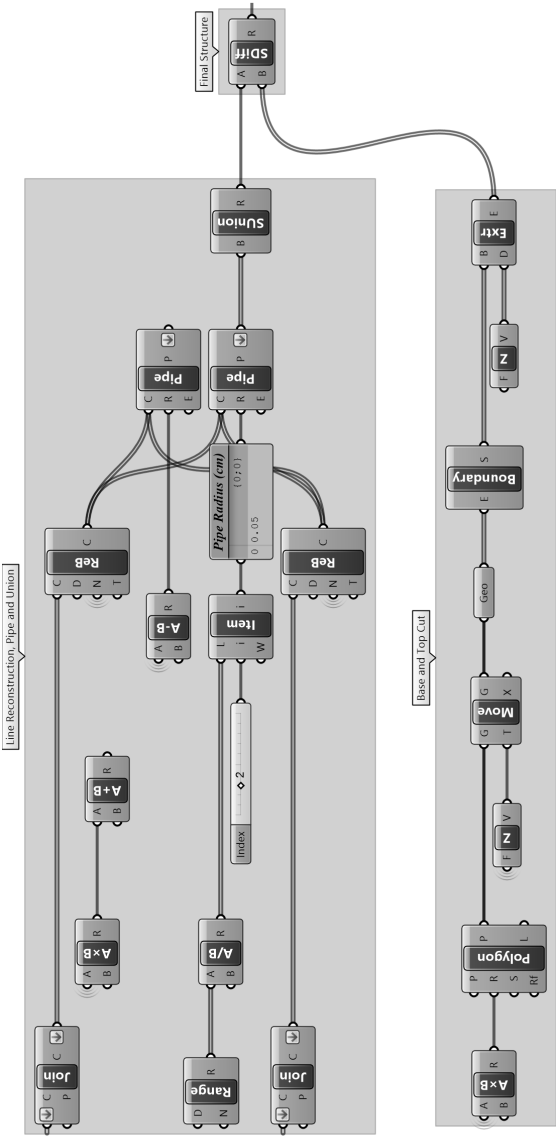
Anexo 2 - Modelo Computacional — parte
2. Definição da divisão da superfície
externa da coluna em subsuperfícies.

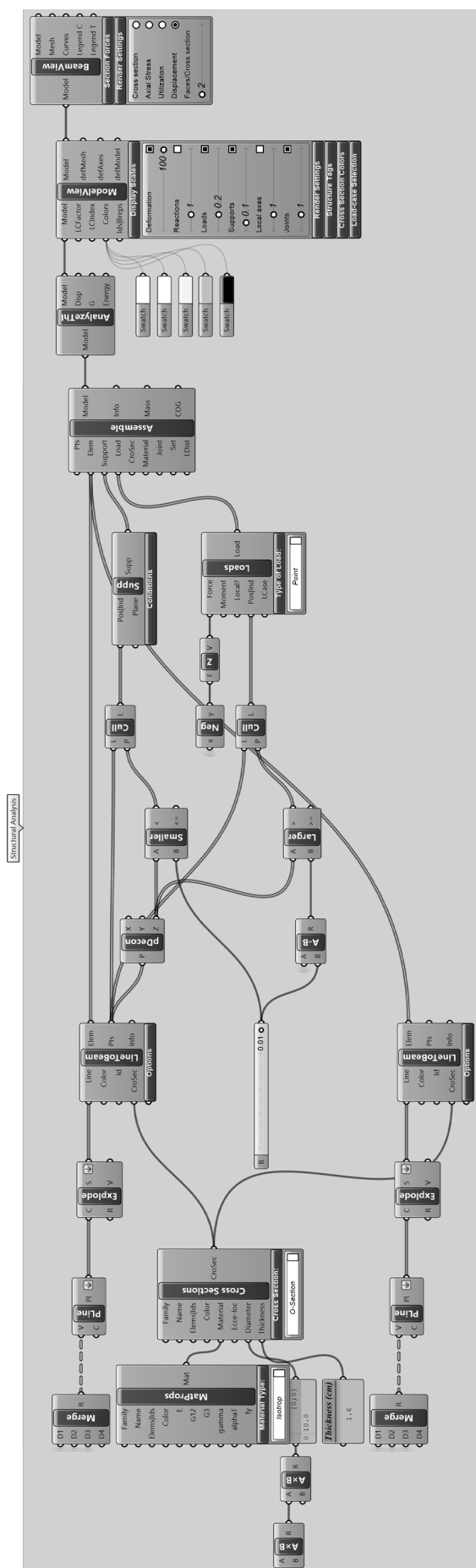


Anexo 3 - Modelo Computacional
— parte 3. Definição do padrão que
constrói a grelha estrutural reticulada
e análise das respectivas amplitudes
presentes ao longo da coluna.



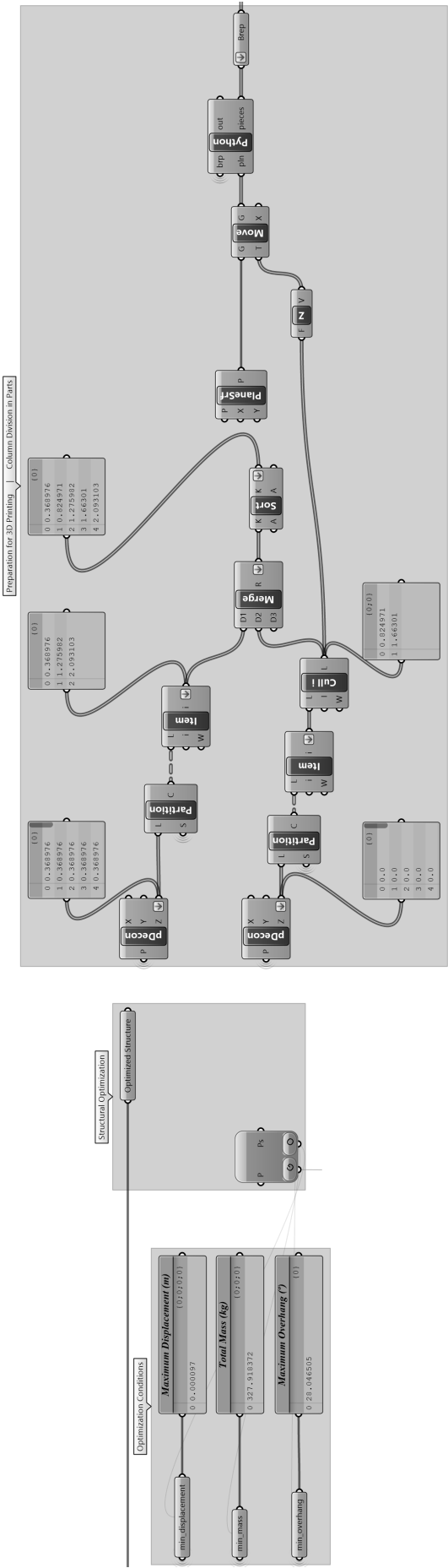
Anexo 4 - Modelo Computacional — parte 4. Introdução da suavização das curvas presentes na grelha estrutural reticulada e definição das suas espessuras, criando os elementos tubulares.

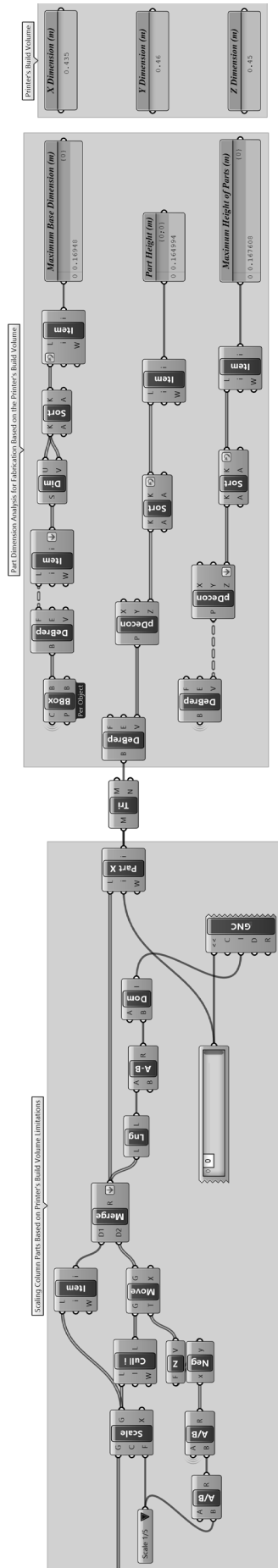




Anexo 5 - Modelo Computacional —
parte 5. Execução da análise estrutural
através do software Karamba 3D.

Anexo 6 - Modelo Computacional —
parte 6. Otimização estrutural através
do software Octopus e divisão da coluna
em partes para fabrico aditivo cerâmico.





Anexo 7 - Modelo Computacional — parte 7. Posicionamento das diferentes partes da coluna na origem (0,0,0) e análise das suas dimensões, para facilitar a sua introdução no software XYLinus, no intuito de gerar o seu respetivo g-code.



Anexo 8 - Impressão de uma das partes do protótipo final, à escala 1:5 (à esquerda) e à escala 1:2 (à direita).

