



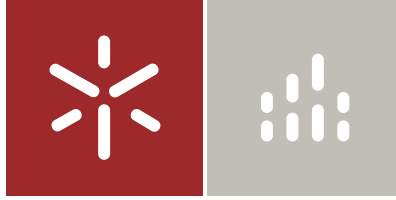
Universidade do Minho  
Escola de Arquitectura

João António Nogueira Carvalho

Cerâmica 3D: Sistemas digitais para a  
personalização do desenho e fabrico de  
componentes arquitetónicos







Universidade do Minho  
Escola de Arquitectura

João António Nogueira Carvalho

Cerâmica 3D: Sistemas digitais para a  
personalização do desenho e fabrico de  
componentes arquitetónicos

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

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

# Declaração

**Nome.** João António Nogueira Carvalho

**Endereço eletrónico.** joaodcarvalho@sapo.pt

**Telefone.** 917489799

**Bilhete de identidade / cartão de cidadão.** 14545500

**Título da tese.** Cerâmica 3D: Sistemas digitais para a personalização do desenho e fabrico de componentes arquitetónicos

**Equipa de orientação.**

Professor Doutor Bruno Acácio Ferreira Figueiredo

Professor Doutor Paulo Jorge Sousa Cruz

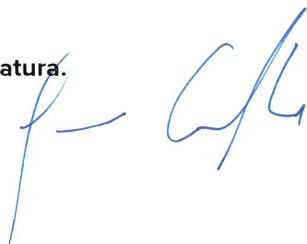
**Ano de conclusão.** 2018

**Mestrado em Arquitetura**

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

Universidade do Minho, 26 de Março de 2018

**Assinatura.**

A handwritten signature in blue ink, consisting of a stylized 'J' followed by a series of loops and a final flourish.

# Agradecimentos

Em primeiro lugar um especial agradecimento à minha equipa de orientação pela disponibilidade, empenho e entusiasmo sempre demonstrados ao longo dos trabalhos da tese.

Ao Samuel pelo apoio técnico, pela amizade e pela dedicação demonstrada ao longo deste ano.

A todos os amigos que pontuaram este trabalho com momentos descontraídos e me acompanharam até ao final.

À Fernanda por me “ensinar” a pontuar.

À minha família pelo apoio e compreensão de sempre.

**Obrigado.**



# Resumo

O surgimento e disseminação de tecnologias de fabrico aditivo, nomeadamente de impressão tridimensional, contribui para uma mudança de paradigma no processo de conceção e construção do projeto ao permitir que estas duas fases tradicionalmente autónomas se aproximem. Recentemente, tal como muitos outros materiais, a aplicação de cerâmica em tecnologias de fabrico digital expandiu consideravelmente os limites formais, performativos e funcionais que os elementos cerâmicos podem aportar para o contexto da construção e arquitetura.

À implementação de processos de fabrico aditivo para a conceção de componentes arquitetónicos, associa-se ainda a possibilidade de produção em série de sistema personalizáveis. Graças a esta tecnologia, e com a integração de processos de desenho paramétrico, na conceção do projeto são criados sistemas que formulam várias soluções, selecionando aquela que melhor responde às necessidades do problema. Deste modo o desenvolvimento de componentes arquitetónicos cerâmicos poderá beneficiar destes dois fatores tendo em vista dar respostas a contextos específicos e objetivos multidisciplinares.

Focando-se no desenho e produção de componentes arquitetónicos cerâmicos totalmente personalizados, esta investigação estuda os principais desafios que a integração de ferramentas de desenho e fabrico digital têm na prática da arquitetura.

Com base em blocos hexagonais o principal caso de estudo da investigação consiste no desenvolvimento de um sistema de cobertura em abóbada que pretende auxiliar ao controlo da incidência solar. Esta otimização dá-se através da variação geométrica da estrutura interna dos blocos. O processo de projeto é mediado por um modelo paramétrico, considerando os dados climatéricos do local, resultando num sistema que adapta a geometria interna de cada um dos blocos em função da sua posição no conjunto, tornando-os mais ou menos permeáveis dependendo da relação espaço/tempo que se pretende sombrear.

**Palavras-chave.** Impressão 3D em cerâmica, fabrico aditivo, desenho paramétrico, desenho performativo.



# Abstract

The emergence and dissemination of additive manufacturing technologies, namely three-dimensional printing, contributes to a paradigm shift in the process of project design and construction by allowing these two traditionally autonomous phases to approach. Recently, like many other materials, the application of ceramics to digital manufacturing technologies has considerably expanded the formal, performative, and functional limits that ceramic elements can bring to the context of construction and architecture.

The implementation of additive manufacturing processes for the design of architectural components also associates the possibility of serial production of customizable systems.

Thanks to this technology, and with the integration of parametric design processes, in the design of the project are created systems that formulate various solutions, helping to select the one that best meets the needs of the problem. In this way the development of ceramic architectural components can benefit from these two factors in order to respond to specific contexts and multidisciplinary objectives.

Focusing on the design and production of fully customized ceramic architectural components, this research studies the main challenges that the integration of digital design and manufacturing tools have in architectural practice.

Based on hexagonal blocks, the main research case is the development of a dome cover system that aims to help control the solar incidence. This optimization takes place through the geometric variation of the internal structure of the blocks. The design process is mediated by a parametric model, taking into account the climacteric data of the site, resulting in a system that adapts the internal geometry of each one of the blocks by their position in the set, making them more or less permeable depending of the space / time ratio that we want to shade.

**Keywords.** Ceramic 3D printing, additive manufacturing, parametric design, performative design.





# Índice

## **1. Introdução. 001**

- 1.1. Tema. 003
- 1.2. Objetivos e considerações gerais. 005
- 1.3. Organização da tese. 007

## **2. Arquitetura digital. 011**

- 2.1. Processos de desenho digital. 013
  - 2.1.1. Desenho assistido por computador. 014
  - 2.1.2. Modelação da informação da construção. 018
  - 2.1.3. Desenho paramétrico. 020
- 2.2. Processos de fabrico digital. 023
  - 2.2.1. Seccionamento. 023
  - 2.2.2. Poligonização. 024
  - 2.2.3. Dobragem. 027
  - 2.2.4. Contorno. 027
  - 2.2.5. Moldagem. 028
  - 2.2.6. Adição. 031
- 2.3. Processos de montagem. 033

## **3. Fabrico aditivo. 037**

- 3.1. Tipos de fabrico aditivo. 039
  - 3.1.1. SLA (Stereolithography). 039
  - 3.1.2. DLP (Digital Light Processing). 039
  - 3.1.3. FDM (Fused Deposition Modelling). 041
  - 3.1.4. MJ (Material Jetting). 041
  - 3.1.5. BJ (Binder Jetting). 042
  - 3.1.6. SLS (Selective Laser Sintering). 042
  - 3.1.7. SLM (Selective Laser Melting). 045
  - 3.1.8. EBM (Electron Beam Melting). 045
  - 3.1.9. LOM (Laminated Object Manufacturing). 045
- 3.2. Materiais. 047
  - 3.2.1. Cerâmica. 047
  - 3.2.2. Polímeros. 050
  - 3.2.3. Metais. 050
  - 3.2.4. Papel. 050
  - 3.2.5. Bio materiais. 053

- 3.3. Aplicações. 055
- 3.4. Limitações. 057

#### **4. Fabrico aditivo em cerâmica. 059**

- 4.1. Impressora 3D. 061
- 4.2. Material. 065
- 4.3. Processo de fabrico. 069

#### **5. Módulo 1 – Sistema para FA de paredes de alvenaria cerâmica. 073**

- 5.1. Objetivo, desenho e função. 075
- 5.2. Modelo computacional. 079
- 5.3. Pasta cerâmica. 083
- 5.4. Configurações da impressora. 085

#### **6. Módulo 2 – Sistema de cobertura. 087**

- 6.1. Objetivo, desenho e função. 089
- 6.2. Modelo paramétrico. 093
  - 6.2.1. Abóbada. 093
  - 6.2.2. Arcos de teste. 095
- 6.3. Produção. 099
  - 6.3.1. Modelos iniciais. 099
  - 6.3.2. Arcos de teste. 099
- 6.4. Resultados. 105
  - 6.4.1. Modelos iniciais. 105
  - 6.4.2. Arcos de teste. 107

#### **7. Conclusão. 117**

#### **8. Bibliografia. 120**

#### **9. Anexos. 130**





# Índice de figuras

**Figura 2.1.** Boing 737 - Modelo digital CATIA.  
Retirado de commons.wikimedia.org

**Figura 2.2.** Peugeot 206 - Modelo digital CATIA.  
Retirado de businesswire.com

**Figura 2.3.** Sólido desenhado a partir de NURBS.

**Figura 2.4.** Sólido desenhado a partir de malhas geométricas.

**Figura 2.5.** Walt Disney Concert Hall - Modelo digital CATIA. Frank Gehry, 2003. Retirado de hbs.org

**Figura 2.6.** Walt Disney Concert Hall - Fotografia da construção. Frank Gehry, 2003. Retirado de mortenson.com

**Figura 2.7.** Exemplo de integração das várias áreas da construção num único modelo digital em Revit. Retirado de dlt.com

**Figura 2.8.** Notre Dame du Haut de Ronchamp - Esquema da estrutura da cobertura. Le Corbusier, 1955. Retirado de Digital Fabrications - Architectural and Material Techniques, Lisa Iwamoto, 2009.

**Figura 2.9.** Burnham Pavillion - Fotografia do exterior. Zaha Hadid Architects, 2009. Fotografia de Roland Halbe.  
Retirado de zaha-hadid.com

**Figura 2.10.** Burnham Pavillion - Desenho CAD da superfície. Zaha Hadid Architects, 2009. Retirado de zaha-hadid.com

**Figura 2.11.** Smithsonian Institution - Fotografia do interior. Foster + Partners, 2007. Retirado de fosterandpartners.com

**Figura 2.12.** Smithsonian Institution - Detalhe dos painéis da cobertura. Foster + Partners, 2007. Retirado de fosterandpartners.com

**Figura 2.13.** Dragonfly - Fotografia da instalação. Tom Wiscombe, 2007.  
Retirado de tomwiscombe.com

**Figura 2.14.** Dragonfly - Fotografia da peça 157 do conjunto. Tom Wiscombe, 2007. Retirado de tomwiscombe.com

**Figura 2.15.** Design 306 - Fotografia de um dos painéis. Erwin Hauer e Henrique Rosado, 2005. Retirado de erwinhauer.com

**Figura 2.16.** Design 306 - Fotografia do conjunto. Erwin Hauer e Henrique Rosado, 2005. Retirado de erwinhauer.com

**Figura 2.17.** Shiatsu - Esquema de produção. Heather Roberge, 2007.  
Retirado de murmur-la.com

**Figura 2.18.** Quake Column - Pormenor dos blocos. Ronald Rael e Virginia San Fratello. Retirado de emergingobjects.com

**Figura 2.19.** Quake Column - Coluna completa. Ronald Rael e Virginia San Fratello. Retirado de emergingobjects.com

**Figura 2.20.** Flight assembled architecture. Gramazio & Kohler e Raffaello D' Andea, 2012. Retirado de dfab.arch.ethz.ch

**Figura 2.21.** Flight assembled architecture. Gramazio & Kohler e Raffaello D' Andea, 2012. Retirado de dfab.arch.ethz.ch

**Figura 3.1.** SLA (*Stereolithography*). Retirado de licdn.com

**Figura 3.2.** DLP (*Digital Light Processing*). Retirado de 3ders.org

**Figura 3.3.** FDM (*Fused Deposition Modelling*).  
Retirado de amazonaws.com

**Figura 3.4.** MJ (*Material Jetting*). Retirado de romanoff-west.com

**Figura 3.5.** BJ (*Binder Jetting*). Retirado de exone.com

**Figura 3.6.** SLS (*Selective Laser Sintering*). Retirado de mkstechgroup.com

**Figura 3.7.** SLM (*Selective Laser Melting*).  
Retirado de shopmetaltech.com

**Figura 3.8.** EBM (*Electron Beam Melting*). Retirado de catapult.org.uk

**Figura 3.9.** LOM (*Laminated Object Manufacturing*).  
Retirado de 3dprint.com

**Figura 3.10.** Cool Brick – Componente individual.  
Retirado de emergingobjects.com

**Figura 3.11.** Cool Brick – Modo de agregação.  
Retirado de [emergingobjects.com](http://emergingobjects.com)

**Figura 3.12.** Impressão 3D em PLA. Star Lounge – Fotografia do interior.  
Retirado de [emergingobjects.com](http://emergingobjects.com)

**Figura 3.13.** Impressão 3D em PLA. Star Lounge – Pormenor das ligações. Retirado de [emergingobjects.com](http://emergingobjects.com)

**Figura 3.14.** Impressão 3D em papel.  
Retirado de [d2rormqr1qwzpz.cloudfront.net](http://d2rormqr1qwzpz.cloudfront.net)

**Figura 3.15.** impressão 3D de material biológico. Tecido humano concebido para testar cosméticos. Retirado de [signalsblog.ca](http://signalsblog.ca)

**Figura 3.16.** Coração artificial impresso em 3D - pormenor.  
Retirado de [media.licdn.com](http://media.licdn.com)

**Figura 3.17.** Coração artificial impresso em 3D - em funcionamento.  
Retirado de [s.aolcdn.com](http://s.aolcdn.com)

**Figura 4.1.** Impressora 3D Lutum® Mini.

**Figura 4.2.** Parte de um código de controlo numérico utilizado pela impressora.

**Figura 4.3.** Retração após cura à temperatura ambiente (dois dias depois da impressão).

**Figura 4.4.** Acoplagem do cartucho de cerâmica à cabeça de impressão.

**Figura 4.5.** Flexão do braço da impressora provocada pelo peso do cartucho.

**Figura 5.1.** Testes de Pfefferkorn.

**Figura 5.2.** Testes de inclinação. Modelos impressos.

**Figura 5.3.** Estrutura dos blocos tradicionais e blocos personalizados.

**Figura 5.4.** Diferentes padrões para a estrutura interna.

**Figura 5.5.** Conversão das linhas de contorno em *G-Code*.

**Figura 6.1.** Esquema de funcionamento da estrutura de sombreamento.

**Figura 6.2.** Analogia entre suporte (edifício) e peça (bloco).

**Figura 6.3.** Ponto de atração que influencia a abertura dos blocos.

**Figura 6.4.** Modelo tridimensional IDEGUI. Vão envidraçado a sombrear (trama amarela).

**Figura 6.5.** Simulação da incidência solar do dia 21 de Junho às 17h00, sem porteção.

**Figura 6.6.** Simulação da incidência solar do dia 21 de Junho às 17h00, com a estrutura de sombreamento.

**Figura 6.7.** Volume de referência de cada um dos blocos da abóbada (a verde).

**Figura 6.8.** Estrutura interna dos blocos da abóbada. Cruzamento de duas superfícies (verde e azul).

**Figura 6.9.** Planificação e numeração de todos os blocos da abóbada.

**Figura 6.10.** Impressão com a ponta extrusora de 8mm.

**Figura 6.11.** Impressão com a ponta extrusora de 3mm.

**Figura 6.12.** Diferentes caminhos percorridos durante a impressão. À esquerda impressão feita a partir de duas polilinhas interiores e de contorno exterior duplo. À direita impressão feita a partir uma polilinha interior e um contorno exterior.

**Figura 6.13.** Parte do código que traduz a geometria das peças em coordenadas.

**Figura 6.14.** Exportação do G-Code a partir do Repetier Host.

**Figura 6.15.** Suavização superficial das peças. À esquerda antes da suavização, à direita depois da suavização.

**Figura 6.16.** Estufa utilizada para acelerar o processo de desidratação dos blocos cerâmicos.

**Figura 6.17.** Forno para a cozedura dos blocos cerâmicos.

**Figura 6.18.** Teste de impressão 2 - Peça 19, ponta extrusora de 8mm. Após cura à temperatura ambiente.

**Figura 6.19.** Teste de impressão 3 - Peça 19, ponta extrusora de 6mm. Após cura à temperatura ambiente.

**Figura 6.20.** Teste de impressão 4 - Peça 19, ponta extrusora de 3mm. Após cura à temperatura ambiente.

**Figura 6.21.** Teste de impressão 2 - Peça 19, ponta extrusora de 8mm. Após cozedura.



**Figura 6.22.** Teste de impressão 3 - Peça 19, ponta extrusora de 6mm. Após cozedura.

**Figura 6.23.** Teste de impressão 4 - Peça 19, ponta extrusora de 3mm. Após cozedura.

**Figura 6.24.** Deformação da geometria interior do bloco provocada pela retração do material.

**Figura 6.25.** Teste de impressão 5 - Rotura da superfície interior após cura à temperatura ambiente.

**Figura 6.26.** Teste de impressão 6 - Rotura da superfície interior após cura à temperatura ambiente.

**Figura 6.27.** Excerto da tabela relativa à análise da retração dos blocos. Tabela completa disponível em anexo.

**Figura 6.28.** Arco de teste 1.

**Figura 6.29.** Arco de teste 1.

**Figura 6.30.** Arco de teste 1 - pormenor da zona menos permeável.

**Figura 6.31.** Arco de teste 2.

**Figura 6.32.** Arco de teste 2 - pormenor da base.

**Figura 6.33.** Arco de teste 2 - pormenor de uma ligação mecânica.

**Figura 6.34.** Arco de teste 2 - arranque do arco.



# Lista de siglas

- ABS.** *Acrylonitrile Butadiene Styrene*
- AM.** *Additive Manufacturing* (fabrico aditivo)
- BIM.** *Building Information Modeling* (modelação da informação da construção)
- BJ.** *Binder Jetting*
- CAD.** *Computer Aided Design* (desenho assistido por computador)
- CATIA.** *Computer Aided Three-dimensional Interactive Application*
- CAE.** *Computer Aided Engineering* (engenharia assistida por computador)
- CAM.** *Computer Aided Manufacturing* (fabrico assistido por computador)
- CDLP.** *Continuous Digital Light Processing*
- CGI.** *Computer Generated Images*
- CNC.** *Computer Numeric Control* (controlo numérico computadorizado)
- DLP.** *Digital Light Processing*
- DMLS.** *Direct Metal Laser Sintering*
- DOD.** *Drop on Demand*
- EBAM.** *Electron Beam Additive Manufacturing*
- EBM.** *Electron Beam Melting*
- FA.** *Fabrico Aditivo*
- FFF.** *Fused Filament Fabrication*
- FDM.** *Fused Deposition Modelling*
- IDEGUI.** *Instituto de Design de Guimarães*
- LENS.** *Laser Engineering Net Shape*
- LOM.** *Laminated Object Manufacturing*
- MIT.** *Massachusetts Institute of Technology*
- MJM.** *Multi-Jet Manufacturing*
- MJ.** *Material Jetting*
- NPJ.** *Nano Particle Jetting*
- NURBS.** *Non-Uniform Rational B-Splines*
- PLA.** *Polylactic Acid* (ácido polilático)
- SDL.** *Selective Deposition Lamination*
- SLA.** *Stereolithography* (estereolitografia)
- SLS.** *Selective Laser Sintering*
- SLM.** *Selective Laser Melting*
- STL.** *Stereolithography Format File*



# 1. Introdução



## 1.1. Tema

A presente investigação tem como tema o estudo da integração de ferramentas de desenho e fabrico digital no projeto e produção de componentes arquitetónicos totalmente personalizáveis.

Recorrendo a programas informáticos e modelos computacionais para o desenho e à impressão tridimensional em cerâmica para a produção de protótipos, a investigação tem por base o estudo das possibilidades inerentes a esta prática e questiona a vantagem da sua integração em contextos reais.

Sendo a cerâmica um material amplamente utilizado e conhecido na prática arquitetónica, este trabalho procura inovar no modo como a cerâmica se articula e constrói a arquitetura.





## 1.2. Objetivos e considerações gerais

Tendo por base o crescente interesse e o investimento registado na inovação do desenho e produção de componentes arquitetónicos, esta investigação tem como objetivo primário explorar e aferir o potencial da utilização de ferramentas de desenho e fabrico digital na produção destas peças.

Atualmente, e numa altura em que as tecnologias digitais emergem e se começam a difundir, rapidamente se expandem e se expande também o que podemos intuir, desenhar e mais tarde construir. Tradicionalmente, existe uma clara separação entre o momento de desenho do projeto e fase a construção. É justamente nesta possibilidade de mudança de paradigma que esta investigação pretende desenvolver conhecimento.

Atendendo às mudanças ocorridas em outras indústrias, nomeadamente a automóvel, a naval e a aeronáutica, pela integração de ferramentas digitais no desenho e produção dos produtos, pretende-se entender de que forma poderá ser feita e que consequências terá esta integração na arquitetura.

A era digital veio reconfigurar quase por completo a relação entre conceção e produção, criando uma ligação direta entre o que podemos conceber e o que podemos construir. Os projetos não só nascem digitalmente, como também se constroem digitalmente. Tudo isto pode significar uma mudança na organização do setor, com os arquitetos a “terem a oportunidade de desempenharem um papel central, como mestres construtores, a versão do século XXI dos antecessores dos arquitetos medievais” (Kolarevic, 2000).



## 1.3. Organização da tese

O corpo da investigação sintetiza-se neste documento do seguinte modo:

(1) O primeiro capítulo (*1. Introdução*) enquadra e apresenta a temática em estudo (*1.1. Tema*), os objetivos da investigação (*1.2. Objetivos e considerações gerais*) e a organização de todo o trabalho (*1.3. Organização da tese*).

(2) O segundo capítulo (*2. Arquitetura digital*) aborda as temáticas que cruzam as tecnologias digitais com a prática da arquitetura. Em primeiro lugar são apresentadas as principais características dos programas informáticos de desenho de forma tripartida. Numa primeira fase se são apresentadas considerações genéricas sobre o tema (*2.1.1. Desenho assistido por computador*), seguindo-se uma análise mais incisiva sobre duas ramificações destes últimos (*2.1.2. Modelação da informação da construção & 2.1.3. Desenho paramétrico*). À apresentação dos processos de desenho sucede a exposição de uma série de processos de fabrico digital (*2.2. Processos de fabrico digital*), terminando este capítulo com uma breve explanação dos processos de montagem (*2.3. Processos de montagem*).

(3) O terceiro capítulo (*3. Fabrico aditivo*) apresenta as principais considerações sobre o fabrico aditivo, com a descrição dos tipos de tecnologia (*3.1. Tipos*), os materiais (*3.2. Materiais*), análise das suas aplicações (*3.3. Aplicações*) e as limitações (*3.4. Limitações*). Aqui o foco recai sobre questões genéricas de fabrico aditivo, não estando necessariamente relacionadas com a prática arquitetónica.

(4) O quarto capítulo (*4. Fabrico aditivo em cerâmica*) começa pela apresentação da tecnologia utilizada na fase de projeto (*4.1. Impressora 3D*), do material cerâmico utilizado (*4.2. Material*) e do processo de fabrico (*4.3. Processo de fabrico*).

(5) O quinto capítulo (*5. Módulo 1 – Sistema de revestimento de paredes*) apresenta o primeiro caso de estudo desta investigação, onde são descritos os objetivos (*5.1. Objetivo, desenho e função*), toda

a fase de desenvolvimento (5.2. *Modelo computacional*), o processo que levou à determinação da melhor mistura (5.3. *Pasta cerâmica*) e algumas considerações sobre as implicações que as configurações da impressora representam (5.4. *Configurações de impressora*).

(6) O sexto capítulo (6. *Módulo 2 – Sistema de cobertura*) apresenta o segundo e principal caso de estudo da investigação, onde são retratados os objetivos (6.1. *Objetivo, desenho e função*), a fase de desenho (6.2. *Modelo paramétrico*), a fase de produção (6.3. *Produção*) e os resultados da investigação (6.4. *Resultados*).

(7) O sétimo capítulo (7. *Conclusão*) condensa em si as principais conclusões referentes a todas as temáticas abordadas durante os trabalhos da investigação e anteriormente descritas e enumera questões a responder em trabalhos futuros.





## 2. Arquitetura digital

O presente capítulo aborda as temáticas que cruzam as tecnologias digitais com a prática da arquitetura e construção.

Para tal explanação, o foco incide sobre três tópicos sequenciais que acompanham a prática arquitetônica nas suas várias fases.

(1) Desenho (2.1. *Processos de desenho digital*), que compreende a apresentação e descrição de algumas das ferramentas de CAD (desenho assistido por computador), com especial atenção para os modelos computacionais BIM (*Building Information Modeling*) e desenho paramétrico.

(2) Fabrico (2.2. *Processos de fabrico digital*), onde são elencados e descritos os principais métodos de fabrico assistidos por computador, de acordo com as publicações de três autores (Lisa Iwamoto, Nick Dunn e Luka Jančič).

(3) Montagem (2.3. *Processos de montagem*), onde é abordada a montagem de componentes arquitetônicos a partir de modelos computacionais ou ferramentas digitais.





## 2.1. Processos de desenho digital

A era da informação, tal como a era industrial antes desta, está a alterar não só a forma como desenhamos os edifícios, mas também como os fabricamos e construímos (Kolarevic, 2000).

É a partir do novo milénio que as ferramentas de desenho digital começam a ter maior difusão e integração no desenho da arquitetura. Até aí, as ferramentas de desenho assistido por computador (CAD) não refletiam as suas capacidades enquanto instrumentos auxiliares na definição do projeto, nem na transmissão de informação para a construção.

Ferramentas CAD (*Computer Aided Design*) foram gradualmente integradas na prática arquitectónica, não enquanto ferramenta diacrónica da prática, mas sim como um outro meio de representar a mesma arquitetura e as mesmas formas. Mario Carpo (2011) afirma que até ao final dos anos noventa os computadores foram regular e continuamente utilizados para desenhar edifícios vulgares, onde o uso das ferramentas digitais não tem traço aparente.

Por oposição, nas indústrias automóvel, aeronáutica e naval, estas ferramentas, são já amplamente utilizadas e manifestam-se pela criação de produtos otimizados.

Hoje, grande parte das mudanças e inovações decorrem da adoção de técnicas de desenho e produção baseados em processos CAD/CAM (*Computer Aided Manufacturing*) e de novos materiais inventados e amplamente utilizados nas indústrias de design de produto, automóvel, aeroespacial e naval (Kolarevic, 2005).

Seguindo estes exemplos, a arquitetura, nas últimas décadas, tem vindo a efetivar, ainda que de forma pouco significativa, a utilização de ferramentas CAD e BIM na fase de conceção, trazendo novas possibilidades, facilitando o aparecimento de novas geometrias, complexas e dinâmicas.

Atualmente separadas, arquitetura, engenharia e construção poderiam ser integrados num processo colaborativo digital, no qual

os arquitetos poderiam desempenhar um papel central como mestres construtores, a versão do século XXI do arquiteto medieval (Kolarevic, 2005).

A integração de modelos computacionais na arquitetura, geralmente designados de sistemas generativos de projeto, decorre pelo recurso a diferentes tipos de processos algorítmicos. Destes, o desenho paramétrico que, para a conceção do projeto, utiliza um conjunto de parâmetros articulados por fórmulas matemáticas, começa a ter alguma representatividade e a patentear as inúmeras possibilidades e potencial da sua utilização.

Para além de novos conceitos formais, apenas conseguidos à luz da utilização de ferramentas digitais, existe também uma nova materialidade, que lhes dá resposta e os concretiza. Esta reinvenção da prática da arquitetura, manifestada pelas formas curvilíneas e geometrias complexas, dita o fim da relação previsível entre desenho e construção e traz novas oportunidades para a arquitetura.

### **2.1.1. Desenho assistido por computador**

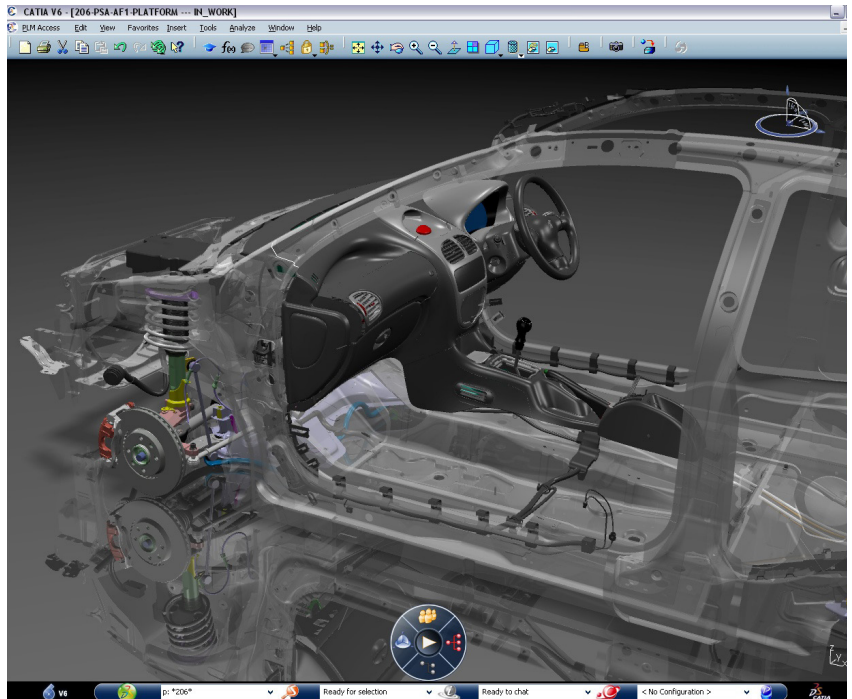
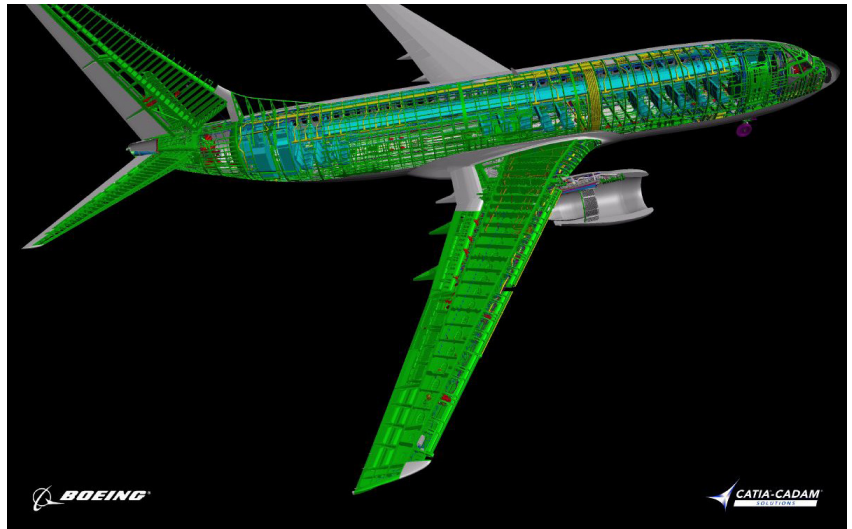
As ferramentas CAD compreendem uma grande quantidade de programas informáticos que, tendo abordagens diferentes na forma como executam as tarefas, produzem resultados e servem propósitos distintos. Dentro deste grande grupo existem os programas que se limitam a criar representações bidimensionais, focando-se na questão do desenho, à semelhança dos métodos tradicionais, e programas que possibilitam a criação de modelos tridimensionais e animações que mais tarde vêm a informar a construção.

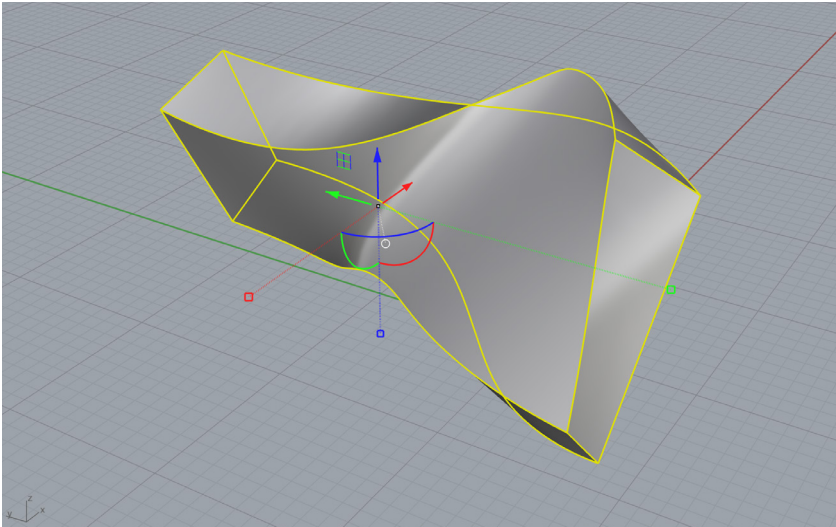
A principal vantagem, e aquela que faz com que estas ferramentas sejam já indispensáveis à prática da arquitetura, reside na execução de trabalho repetitivo, que é facilitado pela presença de comandos como “copiar”, “colar” e “cortar”. Seja em modelos bidimensionais, seja em modelos tridimensionais, estes comandos abreviam exponencialmente o tempo necessário à execução de alterações e ajustes ao projeto.

Por força desta facilidade na manipulação de objetos, quer pelos comandos apresentados anteriormente, quer por outros, é comum que alterações feitas num qualquer elemento do desenho representem mais à frente um problema, caso este elemento apareça representado em mais do que uma ocasião. Ou seja, na utilização deste tipo de ferramentas, para que não haja lugar a incongruências em caso da alteração de um objeto, todas as representações desse mesmo objeto devem ser alteradas uma a uma, manualmente. Quanto maior é o nível de detalhe e complexidade do desenho em questão, maior é o trabalho de revisão e mais tempo demora a sua execução.

**Figura 1.** Boeing 737 - Modelo digital CATIA.

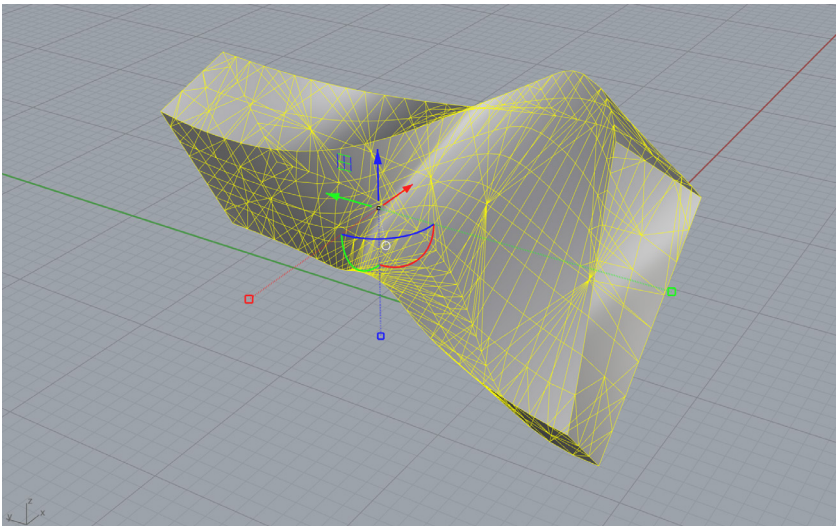
**Figura 2.** Peugeot 206 - Modelo digital CATIA.





**Figura 3.** Sólido desenhado a partir de NURBS.

**Figura 4.** Sólido desenhado a partir de malhas geométricas.



Ferramentas deste tipo são, portanto, bastante úteis quando o projeto já está desenvolvido o suficiente e não há necessidade de fazer grandes alterações. No entanto, nas situações em que tal não acontece, podem levar a grandes gastos de tempo na alteração dos desenhos e por consequência limitar o tempo despendido no estudo do projeto a outros níveis.

Outra vantagem da utilização de ferramentas de CAD na conceção arquitectónica é a possibilidade de criar imagens tridimensionais altamente realistas para a apresentação do projeto.

Do ponto de vista da gestão e organização da informação, os programas CAD operam e gerem os desenhos com base em sistemas de coordenadas, bidimensionais ou tridimensionais, dependendo do tipo de programa, que atribuem uma localização relativa a cada um dos elementos, sendo que essa informação pode facilmente ser transferida por diferentes plataformas aumentando assim o leque de possibilidades.

Na criação de modelos tridimensionais digitais existem duas formas distintas para a criação dos volumes. As NURBS (*Non-Uniform Rational B-Splines*) e as malhas poligonais. Enquanto que as NURBS permitem a criação de superfícies curvas suaves para a construção de um qualquer volume, as malhas poligonais constroem esse mesmo volume a partir de um conjunto de elementos poligonais simples que se vão ajustando até que a forma desejada seja alcançada, dentro da margem de erro inicialmente imposta.

É justamente na conceção da forma que as ferramentas CAD mostram todo o seu potencial e evidenciam as alterações que a arquitetura, a este nível, tem sofrido nas últimas décadas. Com a utilização de modelos tridimensionais digitais a complexidade formal começa a ser uma constante. “Na verdade, sem computadores algumas destas formas - a maioria delas redondas - não poderiam ser desenhadas, medidas nem construídas. No entanto as ferramentas digitais não impõem formas redondas (Mario Carpo, 2011)”.

A disseminação do uso de programas de desenho em projetos de arquitectura, ocorrida na década de 1990, aliada às suas novas possibilidades de modelação tridimensional de geometrias complexas, suscitam o interesse pela exploração de geometrias com carácter amorfo e informal, nomeadamente superfícies curvas irregulares (Figueiredo, 2008).

Não havendo uma relação direta entre a forma curva e a utilização de ferramentas de desenho digital, uma vez que não existe qualquer tipo de imposição ou restrição nesse sentido, a proliferação deste tipo de geometrias a partir dos finais dos anos noventa, pode assentar as suas bases, diz Mario Carpo (2011), na percepção que alguns destes arquitetos - “teóricos experientes da vanguarda digital” - tiveram

da necessidade de uma relação lógica e de diálogo entre tecnologia e sociedade, que poderia conduzir a mudanças sociais.

## 2.1.2. Modelação da informação da construção

O BIM, modelação da informação da construção, é uma ferramenta baseada em modelos tridimensionais digitais que tem como premissa a confluência de todas as componentes diretamente relacionadas com a construção num único modelo digital. O objetivo é a integração e compatibilização de todas as partes envolvidas no processo construtivo num conjunto que seja representativo da realidade idealizada, sem falhas ou obstruções de qualquer uma em relação às outras.

O mesmo objeto, a partir de diferentes escalas de análise ou filtros, assiste toda a representação, de todos os componentes. Permite ainda a automatização de desenhos, mapas, cálculos, quantidades e simulações performativas.

O sistema de ficheiros que utiliza possibilita a rápida partilha de informação entre diferentes programas e diferentes utilizadores, permitindo que, em tempo real, qualquer alteração represente, por exemplo, alterações nas folhas de cálculo dos mapas de quantidades, fazendo com que toda a informação que é possível extrair para informar a construção respeite e se refere àquele projeto.

Atualmente, a crescente expansão desta metodologia deve-se, não só à fácil e rápida ligação que permite entre todas as componentes inerentes à construção, mas também à obrigatoriedade que a sua utilização efetiva terá num futuro próximo ao nível do licenciamento junto das entidades camarárias.<sup>21</sup>

Para além de tudo isto, o desenhador, pode a partir das inúmeras bases de dados disponíveis, testar os produtos existentes no mercado diretamente no modelo, tendo esse teste repercussões em toda a informação do projeto, fazendo com que as escolhas sejam, à partida, as melhores.

O BIM é, portanto, uma ferramenta que permite a ligação de todos os elementos funcionais do projeto ao desenho arquitetónico, promovendo e resolvendo esta interligação desde o início do projeto, levando a que, na fase de execução, incompatibilidades e erros não sejam significativos.

Assim, a construção, tem um conjunto de informações que lhe permite ter uma noção clara daquilo que tem e como tem que fazer, nas várias fases do projeto.

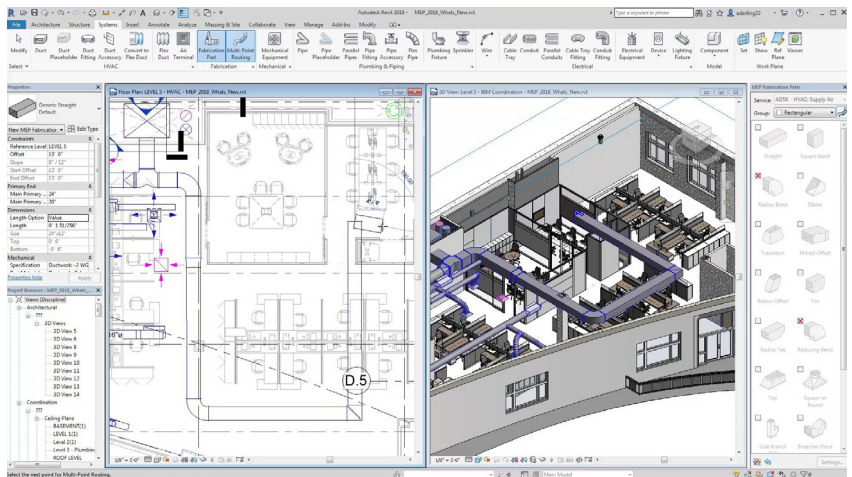
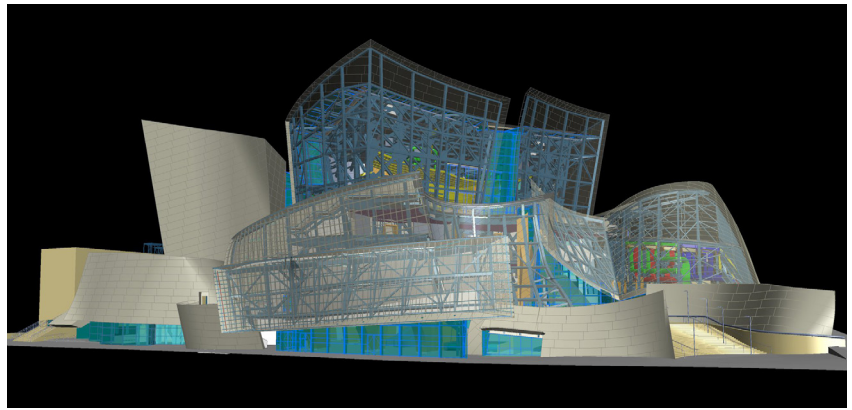
<sup>21</sup> Sobre este diploma já existe documentação disponível para consulta em <http://www.ct197.pt>. A Visão Construção 2020 CT197, tem como objetivo o desenvolvimento de sistemas de classificação, modelação da informação e processos ao longo do ciclo de vida dos empreendimentos de construção.



**Figura 2.5.** Walt Disney Concert Hall - Modelo digital CATIA. Frank Gehry, 2003.

**Figura 2.6.** Walt Disney Concert Hall - Fotografia da construção. Frank Gehry, 2003.

**Figura 2.7.** Exemplo de integração das várias áreas da construção num único modelo digital em Revit.



### 2.1.3. Desenho paramétrico

O desenho paramétrico consiste num processo de conceção de projeto que recorre à quantificação e associação dos elementos que o constituem, através da predefinição de parâmetros comuns. Um parâmetro é a formulação de um problema do desenho ao qual é atribuído um valor ou expressão matemática que o define. É pela associação de cada um destes pequenos problemas que o objeto tridimensional ganha forma.

Inicialmente, uma definição paramétrica era simplesmente uma fórmula matemática que exigia que os valores fossem substituídos por alguns parâmetros para gerar variações dentro de uma família de entidades. Hoje, é usada para implicar que a entidade, uma vez gerada, possa ser facilmente alterada (Kolarevic, 2005).

Por oposição aos programas CAD tradicionais descritos em 2.1.1. *Desenho assistido por computador*, relativamente à natureza independente dos objetos, o desenho paramétrico constrói-se a partir das relações entre cada uma das partes, sendo que toda e qualquer alteração dos valores que definem cada um dos diferentes parâmetros provocará, sempre, repercussão na forma, representação e performance do objeto final.

Outra característica visível do modelo paramétrico – para além da presença de parâmetros – é que a geometria muda quando os parâmetros mudam (Davis, 2013).

Assim, o operador pode, a qualquer altura, alterar os valores dos parâmetros, sendo essas alterações incorporadas no modelo de forma automática, sem que seja necessária outra ação. Todas estas relações são continuamente adaptadas e editadas à medida que o desenhador vê as suas implicações no desenho geral, a nível formal e performativo.

Embora seja entendido como um processo de desenho relativamente recente, na realidade, foi um dos primeiros princípios do CAD. Em *Sketchpad: A Man-Machine Graphical Communications System*, de 1963, é proposta a primeira interface gráfica que permitiria desenhar no computador e causar alterações ao desenho de forma paramétrica. “Um espelho para o maravilhoso mundo da matemática” (Dunn, 2012), é assim que Ivan Sutherland descreve a técnica.

Uma das grandes vantagens do desenho paramétrico é que, uma vez estabelecido o sistema que rege o projeto, este pode correr automaticamente e explorar novas soluções que, à partida, não eram ponderadas, mantendo sempre os preceitos iniciais.

Este processo de criação associativa requer, inicialmente, uma noção formal bastante aguçada uma vez que é necessária a planificação



de todo o sistema gerador da forma. Desta forma, este é um processo de desenho sobretudo indicado para o desenvolvimento de projetos de grande complexidade e que envolvam um grande número de variáveis, na medida em que integra todas essas variáveis numa lógica geral que facilmente pode ser manipulada.

Em contraste com o método falado em 2.1.1. *Desenho assistido por computador*, aqui existe a possibilidade de descrever todo o processo criativo e perceber a relação entre as partes que constituem o projeto. Neste caso, o tempo que tradicionalmente é investido na representação, no desenho de um qualquer objeto, é aplicado na execução de um sistema que irá posteriormente criar o desenho ou os vários desenhos possíveis para dar resposta a um determinado problema.

Para além de poder testar com relativa rapidez várias soluções para o problema em ambiente digital, existe ainda a possibilidade de contabilizar e aferir o real potencial de cada uma dessas resoluções a partir de modelos de análise performativa, permitindo ao utilizador selecionar a que mais lhe convém. Uma vez que a relação entre partes pode ser contabilizada, é também possível utilizar a capacidade de cálculo do computador para que este procure automaticamente a melhor solução em função de variáveis predefinidas, ou seja, definindo intervalos numéricos para estas relações entre elementos do desenho e definindo um objetivo a atingir, a máquina pode correr todos os valores compreendidos nesse intervalo, e no final apresentar aquele que melhor resposta oferece.

Do ponto de vista formal, e tal como já foi referido anteriormente em relação ao CAD tradicional, não existe uma relação direta entre a geometria criada e o processo que a cria. Embora seja comum a associação entre desenho paramétrico e formas curvas, esta não se deve a imposições ou limitações do processo de desenho, mas sim numa escolha do operador ou ao resultado de uma análise das variáveis do problema.



## 2.2. Processos de fabrico digital

As novas tecnologias digitais aplicadas à arquitectura propõem uma reconfiguração da relação entre a fase de concepção e produção dos edifícios, possibilitando uma correspondência direta entre o que se pode conceber e construir, nomeadamente, por processos *file-to-factory* aceites pela integração de tecnologias CAD/CAM, com máquinas de fabrico CNC (*Computer Numeric Control*) (Figueiredo, 2008).

Atualmente, a função das tecnologias de fabrico controladas numericamente – NC (*Numeric Control*) não se restringem à prospecção e criação de protótipos, mas a todos os processos de manufatura realizados através da fabricação de modelos digitais, concebidos em aplicações de desenho e com o auxílio de um sistema de CAM (Figueiredo, 2008).

Dando sequência ao conteúdo apresentado anteriormente em 2.1. *Processos de Desenho Digital*, de seguida serão expostos de forma sucinta os principais processos de fabrico assistidos por computador.

Estes processos podem, de acordo com as metodologias que aplicam, ser organizados em três grandes grupos: processos aditivos - *Moldagem e Adição*; processos subtrativos - *Seccionamento, Poligonização e Contorno*; ou processos transformativos - *Dobragem*.

Para esta explanação são consideradas as publicações de três autores, Lisa Iwamoto (2009), Nick Dunn (2012) e Luka Jančič (2016), onde são descritos e analisados processos de fabrico digital aplicados ao contexto da arquitectura.

### 2.2.1 Seccionamento

O seccionamento é um processo subtrativo que consiste num conjunto de secções ortográficas que “cortam” um qualquer objeto tridimensional numa ou em várias direções em intervalos definidos pelo operador. A partir destas secções que, recorrendo a ferramentas CAD, podem ser conseguidas instantaneamente a partir dos modelos digitais

é criado o objeto final, fiel ao modelo original, pela justaposição ou correta montagem de cada um dos elementos.

Para além do desenvolvimento de um objeto real que segue a geometria do modelo digital de forma rigorosa, este processo permite ainda a inclusão imediata da componente estrutural, materializando-se esta a partir de alguns dos perfis de geração da forma anteriormente falados. Normalmente cruzados, estes elementos formam uma malha estrutural leve, que permite a criação de superfícies de dupla curvatura.

A exemplo da utilização desta técnica na arquitetura, embora num tempo anterior ao da era digital, Lisa Iwamoto (2009, p.10) aponta a cobertura da capela Ronchamp, de Le Corbusier, como um claro exemplo da técnica, que à semelhança da asa de um avião, elemento a que o arquiteto recorre para a caracterizar, a sua forma curva é configurada pela utilização de uma estrutura de vigas cruzadas.

Por sua vez Nick Dunn (2012, p.158) reafirma a facilidade com que se obtém um objeto real e com uma estrutura aparentemente definida a partir de sucessivas secções do modelo, faltando apenas o material que as cobre, a pele. Um projeto que materializa e ilustra estas palavras é o Burnham Pavillion (2009), em Chicago, do gabinete Zaha Hadid Architects, que transparece a ideia de volume seccionado, em que essas secções são a estrutura à qual é apenas adicionado um fino revestimento, a pele.

### **2.2.2. Poligonização**

Este é um processo que se caracteriza pela utilização de elementos de forma poligonal que se ligam entre si formando uma superfície planar ou não planar continua.

Lisa Iwamoto (2009, p.36), que nomeia esta técnica como *Tessellating* (tecelagem), refere que estas “tecelagens” podem ser praticamente de qualquer forma, desde que se interliguem como um puzzle. Como os exemplos mais antigos desta técnica foram fabricados à mão, regra geral os padrões são produzidos manualmente, a partir de um grande número de pequenas peças para formar um desenho coerente ou uma imagem.

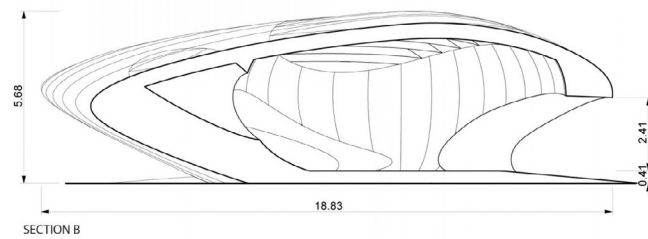
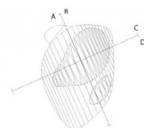
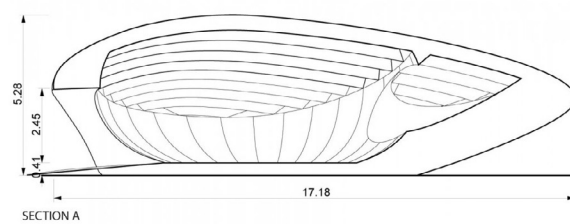
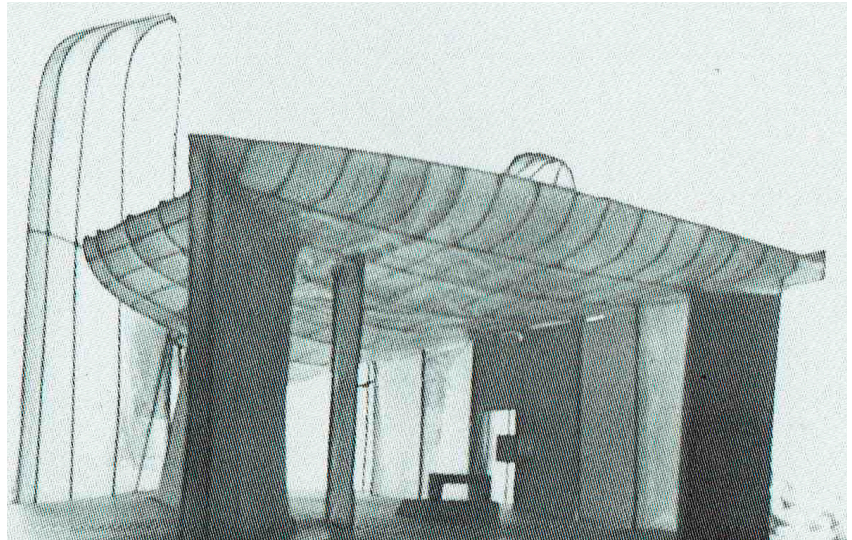
Nick Dunn (2012, p.166) designa o processo como *Tiling* (ladrilho), explicando que no contexto do fabrico digital, a possibilidade de transmitir informação de malhas digitais para máquinas de fabrico de componentes a partir de elementos planares é evidente. Assim, este método de fabrico que permite criar formas tridimensionais complexas a partir de elementos planares simples.

Um projeto que exemplifica bem o processo é o da cobertura do Smithsonian Institution (2007) em Washington, do gabinete

**Figura 2.8.** Notre Dame du Haut de Ronchamp - Esquema da estrutura da cobertura. Le Corbusier, 1955.

**Figura 2.9.** Burnham Pavillion - Fotografia do exterior. Zaha Hadid Architects, 2009.

**Figura 2.10.** Burnham Pavillion - Desenho CAD da superfície. Zaha Hadid Architects, 2009.



**ZAHA HADID ARCHITECTS**  
**BURNHAM PAVILION - CHICAGO**



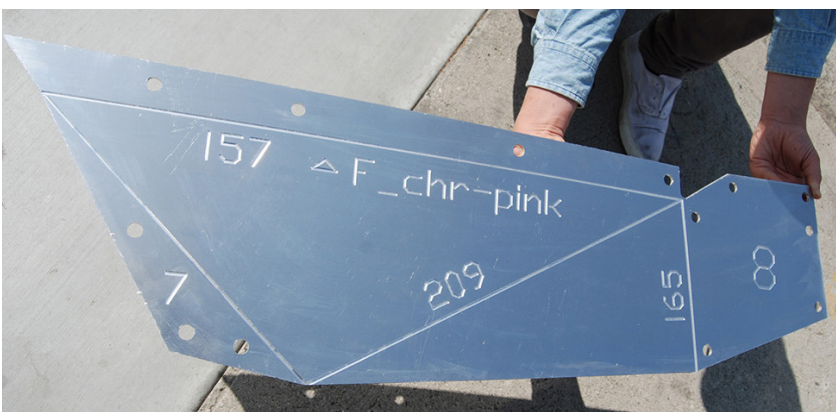
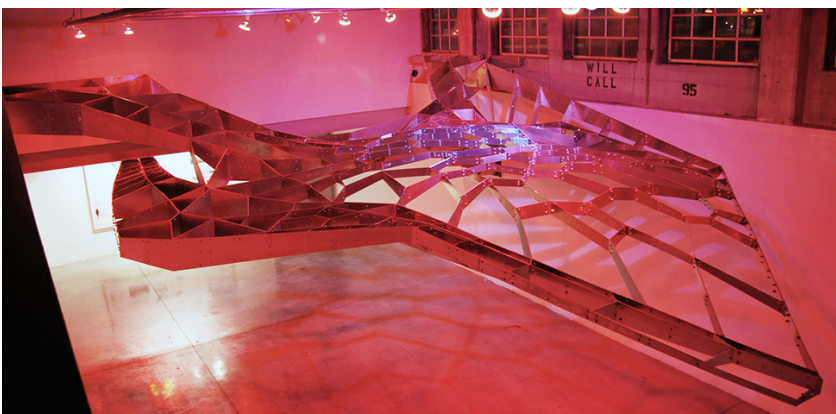


**Figura 2.11.** Smithsonian Institution - Fotografia do interior. Foster + Partners, 2007.

**Figura 2.12.** Smithsonian Institution - Detalhe dos painéis da cobertura. Foster + Partners, 2007.

**Figura 2.13.** Dragonfly - Fotografia da instalação. Tom Wiscombe, 2007.

**Figura 2.14.** Dragonfly - Fotografia da peça 157 do conjunto. Tom Wiscombe, 2007.



Foster + Partners, onde se constrói uma superfície relativamente complexa de dupla curvatura, traduzida por uma malha poligonal e revestida por elementos planares simples.

### **2.2.3. Dobragem**

É um processo transformativo que a partir da dobragem de uma superfície bidimensional de um qualquer material cria objetos ou elementos tridimensionais. É um método em que o material utilizado ganha particular importância, tratando-se de uma operação sustentada nas características físicas e dinâmicas do mesmo.

Lisa Iwamoto (2009, p.62) diz que, quando a dobragem é aplicada a um material planar, este ganha rigidez e estabilidade, conseguindo vencer grandes distâncias e podendo ser autoportante.

A instalação de Tom Wiscombe, Dragonfly (2007), é representativa das possibilidades desta técnica, tendo sido inteiramente construída a partir de folhas de alumínio com cerca de três milímetros de espessura e desenvolvida segundo modelos paramétricos com base na análise da distribuição das cargas, fazendo com que a constituição da estrutura varie no número de camadas entre 1 e 14, dependendo da zona de carga.

Em Digital Fabrication In Architecture, Nick Dunn (2012, p.140) refere a característica mais distinta desta técnica em relação a outras como a possibilidade de continuidade espacial, superficial e de forma que proporciona, habilitando uma fluidez formal distinta dos restantes processos.

Embora as operações materiais pareçam relativamente reduzidas em termos de número quando são usados os métodos tradicionais, as tecnologias digitais permitem o cálculo e definição de formas e padrões complexos proporcionando ao criador um maior leque de opções de design. A aparente ausência de limites da dobragem como ferramenta é assistida e justificada pelo uso de programas de desenho digital que integram funções que convertem formas ou superfícies não regulares em padrões planos desdobrados, prontos para o fabrico digital, recorrendo normalmente a máquinas de corte a laser, plasma ou jato de água.

### **2.2.4. Contorno**

É uma técnica subtrativa que altera a superfície de um material, normalmente planar, removendo sequencial e continuamente camadas, até que o contorno deste coincida com o do modelo digital. Nick Dunn (2012, p.130) aborda o tema afirmando que esta é uma técnica de trabalhar os materiais há muito estabelecida, principalmente

no trabalho da madeira e da pedra, num período que remonta às antigas civilizações. Em contraste com a técnica manual, a utilização de máquinas controladas por computador torna possível a rápida produção de um grande número de peças, sejam elas todas diferentes ou repetidas, sendo que o nível de detalhe em cada um dos casos é exatamente o mesmo. No entanto este método de produção, graças à sua natureza subtrativa, consome bastante tempo e material.

Por sua vez, Lisa Iwamoto (2009, p.90) conta que o fabrico digital permitiu aos arquitetos abandonarem a ideia de que a talha é uma técnica exclusivamente manual. Na verdade, recorrendo a ferramentas de fabrico digital, estas técnicas de trabalhar o material ganharam nova vida. Estas ferramentas, nomeadamente as fresas CNC, trabalham diretamente a partir dos modelos digitais, esculpindo sistematicamente a peça a partir de um conjunto de perfis criado pelo programa informático.

Erwin Hauer e Henrique Rosado, em 2005, criam o Design 306, um conjunto de painéis de revestimento baseados no Design 61 de 1956, e que recorrem a esta técnica para se construir. O processo é bastante simples, existe um bloco maciço planar do material que, recorrendo a uma fresa CNC de três eixos, é submetido a sucessivas subtrações de material, até que a sua superfície coincida com a do modelo digital.

## **2.2.5. Moldagem**

Os processos de moldagem caracterizam-se pela utilização de moldes ou negativos de um objeto para a sua produção. Para o fabrico de cada uma das peças finais é necessária a criação de moldes para que depois o material possa ser injetado, vertido ou transformado, adquirindo, depois de terminado o processo de cura, a forma desejada. Graças à prototipagem rápida é possível desenvolver em primeira instância o positivo do objeto, trabalha-lo, removendo quaisquer imperfeições e, posteriormente, a partir desse positivo criar os moldes que servirão de base à produção efetiva. É um processo sobretudo focado na produção em massa de objetos standardizados e na economia de meios. Os moldes positivos são normalmente utilizados para moldagem térmica ou de vácuo enquanto que os negativos servem para moldagem de fundição ou injeção.

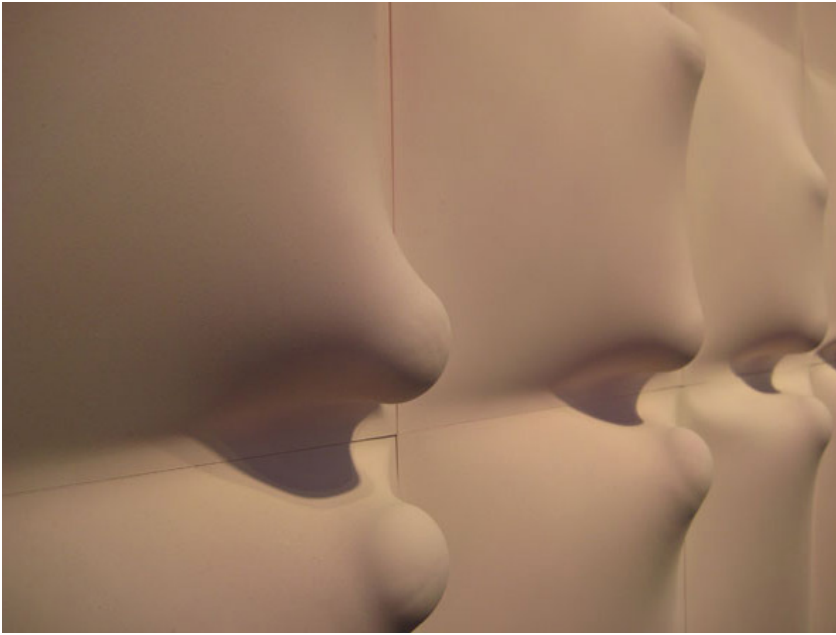
Lisa Iwamoto (2009, p.108), refere que, no contexto da arquitetura, este método de fabrico serve fundamentalmente a produção de componentes como painéis de revestimento de fachadas. Para além destes (painéis de revestimento), este método é utilizado para a produção de componentes de grande escala e quantidades reduzidas como é o caso de elementos estruturais como vigas, pilares e lajes, elementos ornamentais, paredes ou até mesmo todo o edifício.



**Figura 2.15.** Design 306 - Fotografia de um dos painéis. Erwin Hauer e Henrique Rosado, 2005.

**Figura 2.16.** Design 306 - Fotografia do conjunto. Erwin Hauer e Henrique Rosado, 2005.





**Figura 2.17.** Shiatsu - Fotografia do conjunto. Heather Roberge, 2007.

**Figura 2.18.** Quake Column - Pormenor dos blocos. Ronald Rael e Virginia San Fratello.

**Figura 2.19.** Quake Column - Coluna completa. Ronald Rael e Virginia San Fratello.



Nick Dunn (2012, p.148) descreve a moldagem como um processo de geração de componentes a partir de um molde, que é sobretudo utilizado na produção em massa de bens de consumo. Este autor também aborda a utilização do método na indústria da construção, referindo-se a elementos de revestimento de fachadas e componentes com grande detalhe. Alude, inclusive, que no terreno, este é já um processo bastante utilizado para a produção de elementos estruturais pré-fabricados, bem como de paredes e elementos de circulação do edifício.

Criada por Heather Roberge em 2007, Shiatsu é uma criação que expressa de forma bastante clara o princípio inerente a este processo, mostrando a relação entre molde e objeto formado.

### **2.2.6. Adição**

Os processos de fabrico aditivo envolvem a criação de um objeto pela sucessiva deposição de material em camadas, sendo cada uma dessas camadas suportada pela anterior. Esta técnica permite a utilização de praticamente qualquer material, desde que este permita, em primeira instância, a sua transformação em pó ou filamento termossensível.

De acordo com Luka Jančič (2016, p.14), o princípio da produção aditiva é a deposição e posterior solidificação de material em camadas, nos locais onde é necessário. A utilização de camadas permite a produção de geometrias bastante mais complexas do que as conseguidas por processos subtrativos, onde partes do material são removidos, ou de processos transformativos onde ferramentas especiais ou moldes são empregues para chegar à forma final.

No contexto do fabrico aditivo a materialização de geometrias complexas leva o mesmo tempo, esforço e recursos que a produção de geometrias mais simples. Em contrapartida este é um processo que geralmente limita a produção a um único material (embora haja equipamentos que já permitem a utilização de vários materiais), e o material nem sempre adquire as mesmas propriedades das conseguidas em pelos processos tradicionais.

A exemplo da utilização desta técnica temos o trabalho de Ronald Rael e Virginia San Fratello que testam a utilização do fabrico aditivo utilizando areia, construindo uma coluna torcida a partir de um conjunto de blocos que se articulam e interligam. A *Quake Column* desenha-se com base nas técnicas tradicionais *Incan ashlar* usando os princípios de dissipação da força de um terramoto, característico desta técnica.



## 2.3. Processos de montagem

Depois da produção de cada uma das peças que compõem um determinado projeto, a sua montagem pode também ser assistida por computador. Os mesmos modelos tridimensionais que servem para a planificação e informação do fabrico dos componentes podem também informar a construção dando instruções precisas acerca do posicionamento e das etapas de montagem de cada um dos componentes do conjunto.

Assim sendo os métodos tradicionais de localizar e efetivar a montagem ou a construção, que usam dimensões e coordenadas retiradas a partir de desenhos em papel muitas vezes escalados, podem ser substituídos por outros que garantem maior rigor.

Tecnologias digitais como o levantamento eletrónico e o posicionamento laser são cada vez mais utilizadas na construção para determinar de forma precisa a real localização de cada componente.

De acordo com Branko Kolarevic (2001), o museu do Guggenheim em Bilbao (1997), foi inteiramente construído sem que fosse utilizada uma única fita métrica. Para a construção desta icónica obra de Frank Gehry, durante a fase de fabrico dos componentes estruturais, nas suas terminações, foram colocados códigos de barras com as indicações para a montagem e para a localização relativa de cada uma das peças no conjunto.

Esta, tal como muitas outras obras do Gehry Partners, LLP, utiliza processos de fabrico bastante comuns noutras indústrias como a automóvel e aeronáutica. Para criar estas obras Gehry recorre um programa inicialmente desenvolvido para a indústria da aviação, o CATIA, da empresa francesa *Dassault Systèmes*, que concilia lógicas de CAD, CAM e CAE (*Computer Aided Engineering*).

Mais recentemente, com a introdução de robots industriais no fabrico e montagem de elementos arquitetónicos, o controlo de todo o processo, desde a conceção até à execução, foi amplamente expandido, principalmente neste último, onde a montagem de elementos, com utilização destas tecnologias é totalmente personalizável.

Com a introdução de robots industriais na investigação arquitetónica, o alcance dos processos de fabrico assistidos por computador aumentou drasticamente. Ao contrário dos equipamentos especializados, como as máquinas CNC regulares, o alcance do robot industrial não é apenas definido pela sua cinemática e oferece a oportunidade de não só personalizar os componentes que produz, mas muito além disso, personalizar todo o processo de fabrico (Hack, 2014).

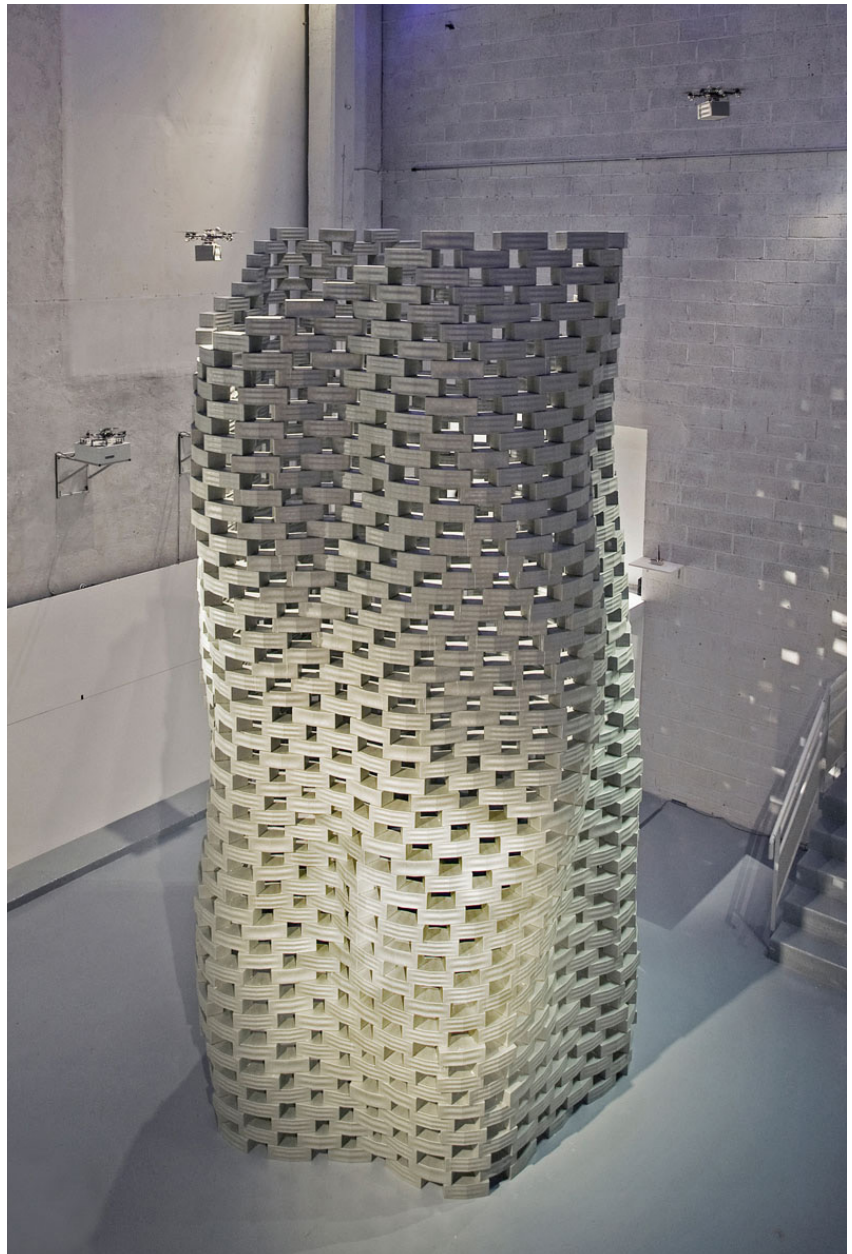
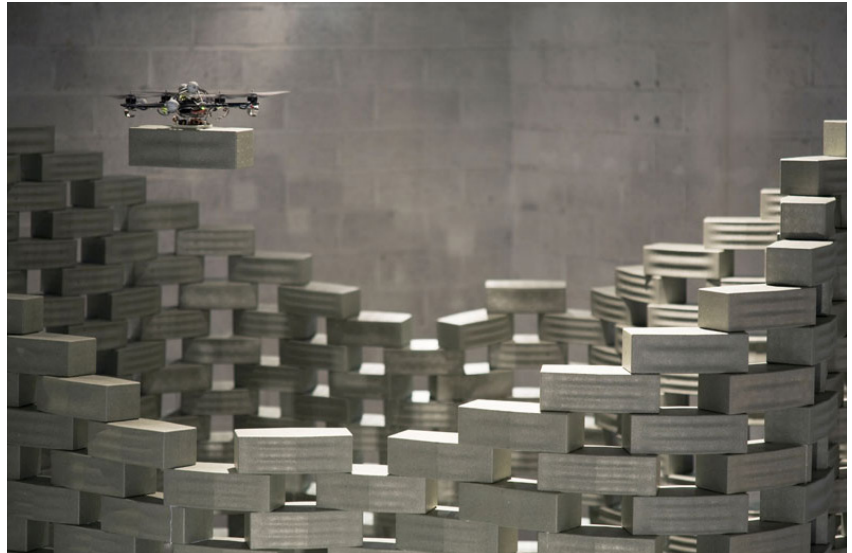
Embora ainda seja uma tecnologia relativamente recente, sendo sobretudo utilizada por estudantes e investigadores, existe já uma grande quantidade de estruturas arquitetónicas de pequena escala, que mostram as capacidades e flexibilidades destes robots (Hack, 2014).



**Figura 2.20.** *Flight assembled architecture.* Gramazio & Kohler e Raffaello D' Andea, 2012.

**Figura 2.21.** *Flight assembled architecture.* Gramazio & Kohler e Raffaello D' Andea, 2012.

**Nota.** *Flight assembled architecture.*  
Video da montagem disponível em  
<https://vimeo.com/69257453>







## 3. Fabrico aditivo

Tal como já referido em 2.2.6. *Adição*, o fabrico aditivo é uma técnica de fabrico que envolve a formação de um qualquer objeto tridimensional pela sucessiva adição de material em camadas.

No entanto, e tal como em todos os processos de fabrico digital anteriormente abordados, tendo uma mesma lógica primária de produção, existem diferenças substanciais na forma como ela se procede, sendo este terceiro capítulo uma explanação destas ramificações. Para tal registo, e pela ausência de conceitos e definições estabilizadas, existem várias abordagens possíveis, pelo que, para a listagem dos conceitos e definições de seguida apresentadas, foi adotada a lógica utilizada pelo *all3dp.com*, um portal online especializado em fabrico aditivo.

Apesar de materializarem os objetos de formas relativamente diferente umas das outras, estas tecnologias partilham o mesmo tipo de informação. O sistema de ficheiros utilizado, quer pelos programas informáticos que acompanham as ferramentas, quer pelos programas genéricos de controlo CAM, é regra geral o mesmo, o STL (*Stereolithography format file*).



## 3.1. Tipos de fabrico aditivo

### 3.1.1. SLA (*Stereolithography*)

A estereolitografia, é a mais antiga técnica de produção aditiva e funciona pela exposição de uma camada de resina líquida fotossensível a um laser ultravioleta que faz com que esta solidifique. Permite a criação de superfícies extremamente detalhadas e tem-se tornado bastante popular na criação de moldes para as indústrias dentária e joalheria.

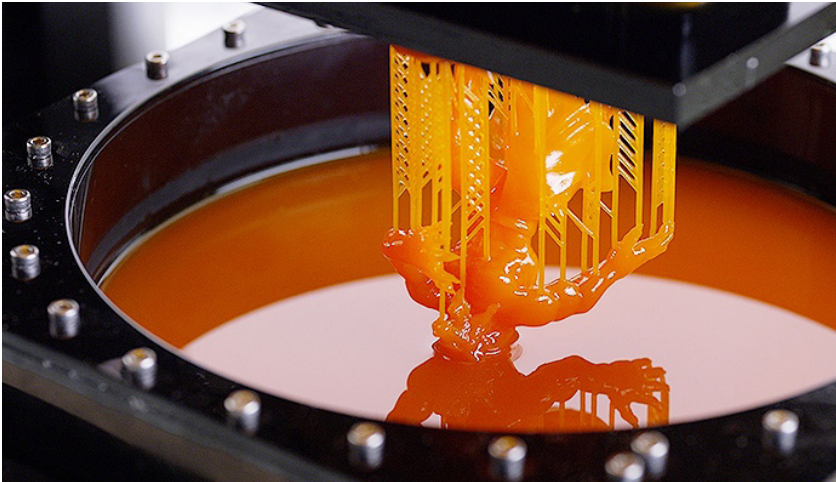
Tal como grande parte dos processos de fabrico aditivos este funciona por camadas. Assim que o laser solidifica uma camada de resina, a plataforma onde o objeto se está a construir desloca-se na vertical o intervalo correspondente à espessura da camada, permitindo que a resina líquida cubra a resina solidificada. O processo é repetido continuamente até ao objeto estar finalizado.

Quando uma das camadas não assenta na que a antecede, é criada uma estrutura de suporte para que o objeto possa ser produzido. Quando tal sucede é necessário algum trabalho de pós-produção para a remoção destas estruturas de suporte, para além do também necessário banho de solvente e/ou cura com luz ultravioleta.

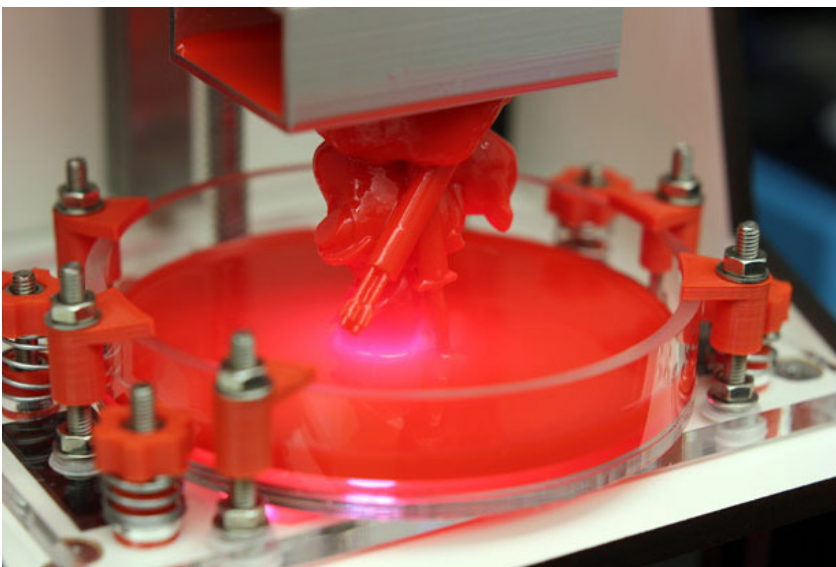
### 3.1.2. DLP (*Digital Light Processing*)

Tal como o SLA, o DLP utiliza resinas líquidas fotossensíveis. A principal diferença entre os dois tipos de produção está na luz utilizada na fase de cura. Enquanto que o SLA usa um laser ultravioleta, o DLP utiliza um projetor especial.

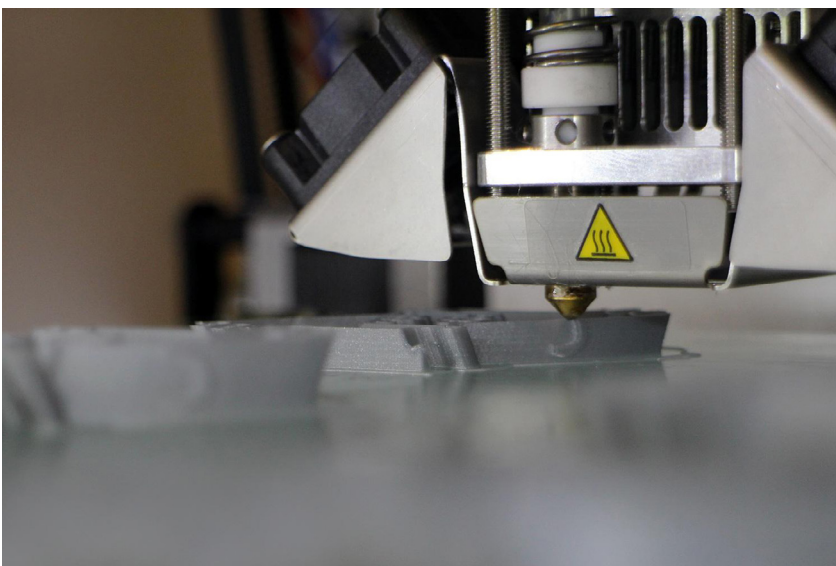
Larry Hornbeck, da Texas Instruments, inventou em 1987 esta tecnologia que usa uma fonte de luz e uma grelha de espelhos microscópicos, com cerca de 10 microns de lado, sobre uma placa semicondutora controlada por computador, que usa atração electrostática para os fazer mover. Cada um destes espelhos inclina-se em duas direções e é essa inclinação que vai fazer com que a luz seja projetada no plano de cura ou internamente num plano preto que



**Figura 3.1.** SLA (*Stereolithography*).



**Figura 3.2.** DLP (*Fused Deposition Modelling*).



**Figura 3.3.** FDM (*Fused Deposition Modelling*).

absorve a luz indesejada. Funciona como um qualquer ecrã em que dependendo do local para onde o espelho está inclinado vai fazer com que o ponto a que ele corresponde na grelha de projeção esteja “ligado” ou “desligado”.

A principal vantagem desta tecnologia é o tempo, uma vez que permite a cura da resina de forma quase instantânea, camada a camada, ao invés do SLA que é ponto a ponto. Permite também a criação de peças com elevada resolução e robustez.

### **3.1.3. FDM (*Fused Deposition Modelling*)**

FDM ou FFF (Fused Filament Fabrication) é a tecnologia de fabrico aditivo mais usual e é aquela que pode ser mais facilmente adquirida e utilizada por qualquer pessoa. A impressora 3D de secretária.

É um processo que usa termoplásticos em forma de filamento ou grão, sendo estes aquecidos até a uma temperatura em que são facilmente maleáveis, normalmente entre 200 e 220°C. Posteriormente são extrudidos pela cabeça de impressão que deposita o material derretido nas coordenadas indicadas pelo código de controlo. Terminada a deposição de material numa camada há lugar a uma deslocação vertical de medida igual à da espessura da camada para que seja depositado o material correspondente à camada seguinte.

Quando uma camada excede os contornos da camada anterior, tal como acontece com o SLA, é criada uma estrutura de suporte que lhe serve de base e permite a deposição do material. Como tal, depois de finalizado o fabrico do modelo, é necessário algum trabalho para a remoção destas estruturas de suporte.

Algumas destas impressoras, de baixo custo, representam uma grande oportunidade para o desenvolvimento de protótipos ou produtos de forma relativamente rápida e barata, para além da qualidade geral dos materiais.

### **3.1.4. MJ (*Material Jetting*)**

Esta tecnologia, também conhecida como “moldagem de cera”, tem como princípio uma técnica bastante utilizada pela joalharia. A moldagem de cera permite a criação de peças de joalharia de alta qualidade e em bastantes tipos de material. O que a impressão tridimensional faz é automatizar este processo.

A cera derretida é depositada numa plataforma em alumínio, camada a camada, através de várias pontas extrusoras. Assim que o material toca a plataforma começa a solidificar.

Neste processo são utilizados dois tipos de cera com diferentes pontos de fusão para que seja possível construir uma estrutura de suporte ao objeto facilmente removível.

A remoção da estrutura de suporte é conseguida através de um banho quente que derrete a cera do suporte, que tem uma temperatura de fusão inferior, deixando o objeto formado pelo segundo tipo de cera intacto.

### **3.1.5. BJ (Binder Jetting)**

Esta tecnologia foi inventada no MIT (*Massachusetts Institute of Technology*) e tem várias denominações possíveis. É uma tecnologia de fabrico aditivo que usa dois materiais para a criação dos modelos: um pó, normalmente gesso, e um agente aglutinador que funciona como uma cola que vai ligar as diferentes camadas de gesso.

O processo é bastante simples e semelhante ao que é utilizado no SLS ou SLM. Inicia-se com uma fina camada de gesso numa plataforma onde uma cabeça de impressão, muito semelhante à de uma impressora tradicional, deposita o agente aglutinador líquido, formando uma camada. De seguida a plataforma desloca-se no sentido contrário ao da cabeça de impressão, uma mediada igual à da espessura de uma camada e, um rolo, espalha uma nova camada de gesso sobre a anterior. O processo repete-se até ao modelo estar concluído.

Este processo traz grandes vantagens, uma vez que não há desperdício de material, o pó sobranete pode ser reutilizado, e há ainda a possibilidade de construir um modelo tridimensional com cor, apenas pela adição de pigmentos ao agente aglutinador. Em sentido contrário está a pouca resistência física destes objetos, que por serem inteiramente construídos em gesso apresentam grande fragilidade.

### **3.1.6. SLS (Selective Laser Sintering)**

SLS é uma tecnologia muito semelhante ao SLA. A principal diferença está no tipo de material que é utilizado para a produção dos objetos. Enquanto que SLA usa resinas líquidas sensíveis à luz o SLS utiliza pó.

Um laser é usado para sinterização seletiva de camadas de pó, abaixo do ponto de fusão, criando uma fina camada de pó solidificado. Depois disto a plataforma desloca-se na vertical no sentido contrário ao do laser uma distância igual à da espessura da camada, permitindo que uma nova camada de pó possa ser depositada em cima da anterior para nova sinterização, repetindo-se este processo até ao objeto estar completamente formado. Depois disto fica a arrefecer na máquina até que possa ser extraído.

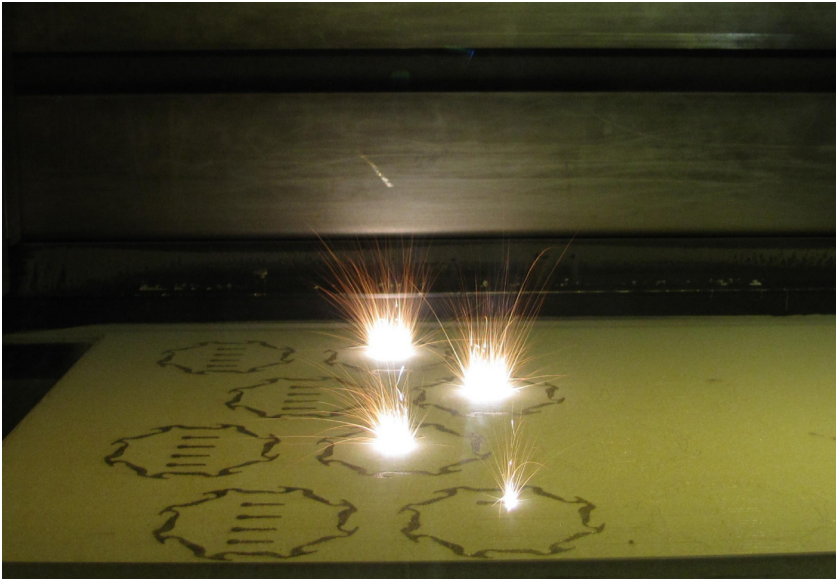


**Figura 3.4.** MJ (*Material Jetting*).

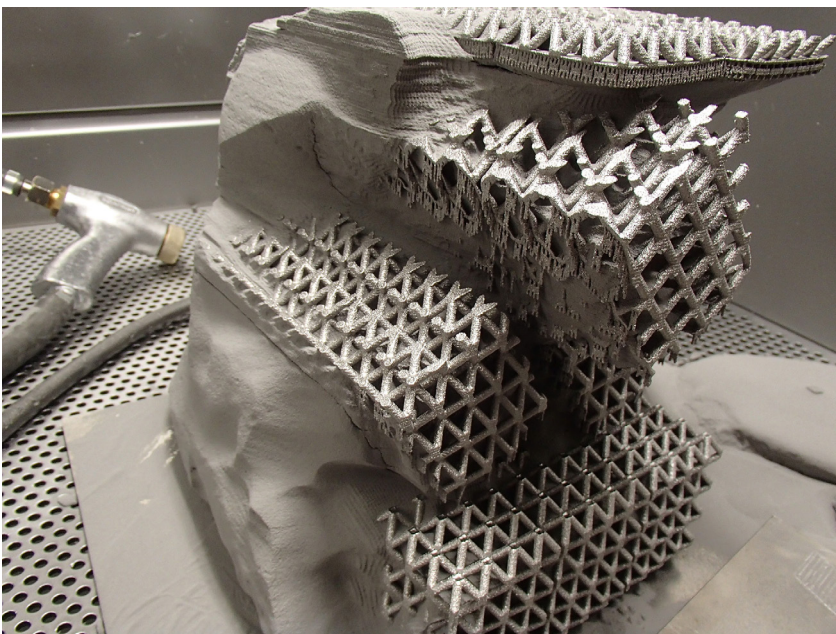
**Figura 3.5.** BJ (*Binder Jetting*).

**Figura 3.6.** SLS (*Selective Laser Sintering*).

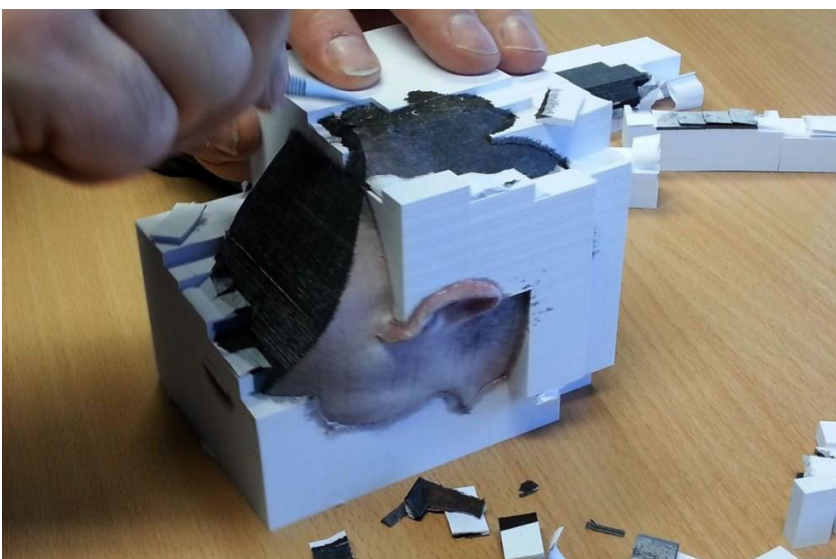




**Figura 3.7.** SLM (*Selective Laser Melting*).



**Figura 3.8.** EBM (*Electron Beam Melting*).



**Figura 3.9.** LOM (*Laminated Object Manufacturing*).



Esta tecnologia é largamente utilizada na produção de protótipos, utilizando uma vasta gama de materiais como vidro, cerâmica, alumínio, prata ou aço. A principal desvantagem está nos lasers bastante dispendiosos que são necessários para a sinterização.

### **3.1.7. SLM (Selective Laser Melting)**

Esta tecnologia é por vezes considerada uma subcategoria da SLA pela semelhança entre os processos. O SLM usa um feixe laser de alta potencia para fundir o pó metálico em objetos tridimensionais.

Possibilitando a criação de geometrias complexas com dimensões bastante reduzidas, o SLM é utilizado por muitas industrias, nomeadamente na aeroespacial e médica ortopédica.

Os materiais normalmente utilizados neste processo são o alumínio, aço inoxidável, titânio e o cobalto.

### **3.1.8. EBM (Electron Beam Melting)**

Por oposição ao SLM, o EBM usa um feixe de eletrões controlado por computador sob vácuo para fundir pó metálico a temperaturas acima dos 1000°C.

Normalmente utilizada para desenvolver componentes para a industria aeroespacial e implantes médicos, esta tecnologia utiliza titânio puro ou ligas de alumínio.

Tem como principais desvantagens o facto de ser bastante lenta a produzir, para além de ser uma tecnologia bastante dispendiosa.

### **3.1.9. LOM (*Laminated Object Manufacturing*)**

LOM é uma tecnologia que utiliza folhas de papel, plástico ou metal, cortados por um laser ou uma lâmina, fundidos com as restantes camadas sob calor e pressões intensas.

É um processo subtrativo que usa folhas de dimensões estandardizadas que vai removendo material camada a camada. O que resulta do corte é colocado em cima da camada anterior, repetindo-se este processo até que o objeto esteja completamente formado. Assim que o material excedentário é removido o objeto pode ser alvo dos habituais trabalhos de acabamento onde se incluem o alisamento da superfície e a pintura.

Sendo uma das tecnologias de fabrico aditivo mais barata, simples e rápida, tem contra si o facto de não permitir grande precisão.



## 3.2. Materiais

Com o crescente interesse pelas ferramentas de fabrico aditivo, aliado ao baixo custo que esta tecnologia representa neste momento, os materiais, em razão disso, tiveram um grande desenvolvimento aumentando consideravelmente a sua variedade, as possíveis aplicações e sobretudo as suas qualidades físicas.

Hoje existe uma enorme gama de diferentes materiais que podem ser utilizados em ferramentas de fabrico aditivo que, com diferentes propósitos, dão resposta às mais variadas necessidades do utilizador. Estes materiais podem ser encontrados em pó, filamento, grão ou como resinas líquidas.

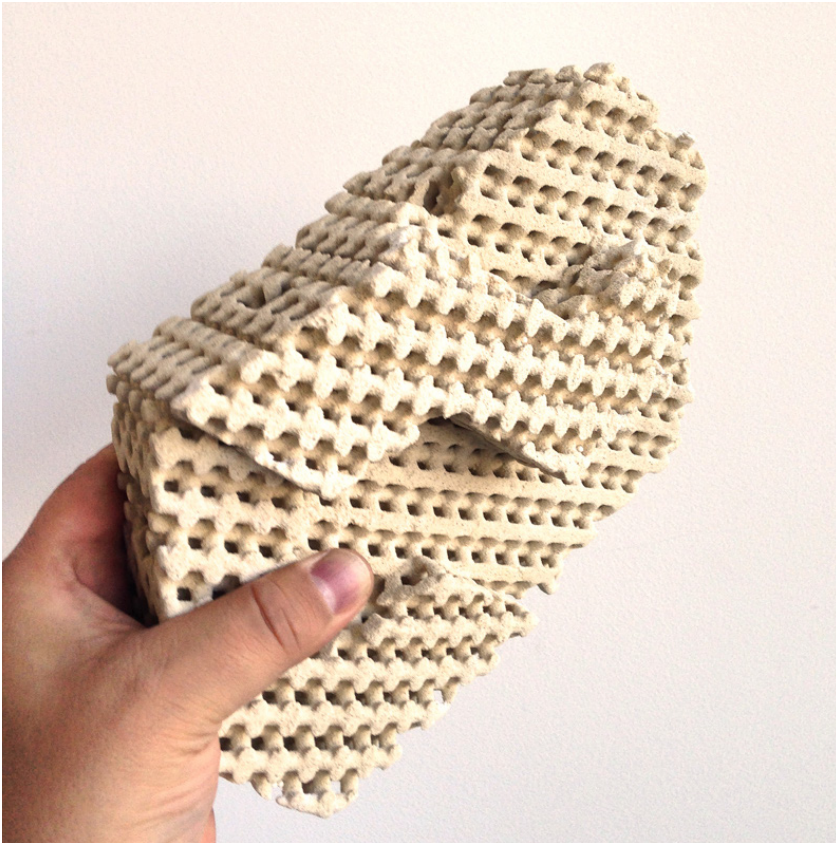
Os materiais são desenvolvidos para propósitos específicos, aumentando assim a sua capacidade de resposta à tarefa para a qual foram concebidos.

De seguida, e de acordo com a base teórica apresentada em [3dhubs.com](http://3dhubs.com), são apresentados os principais grupos de materiais utilizados em ferramentas de fabrico aditivo.

### 3.2.1. Cerâmica

A cerâmica é um material relativamente recente no que toca à sua utilização em processos de fabrico aditivos. Existem, no entanto, exemplos de utilizações bem sucedidas do material, como é o exemplo do Cool Brick, de Virginia San Fratello e Ronald Rael.

Das diversas propriedades que caracterizam o material cerâmico, destaca-se a sua resistência ao calor e compressão, sendo que único tratamento que este necessita após o fabrico é exatamente o mesmo aquando da sua utilização por processos tradicionais, a cozedura e possível vitrificação.



**Figura 3.10.** Impressão 3D em cerâmica.  
Cool Brick. Virginia San Fratello &  
Ronald Rael.

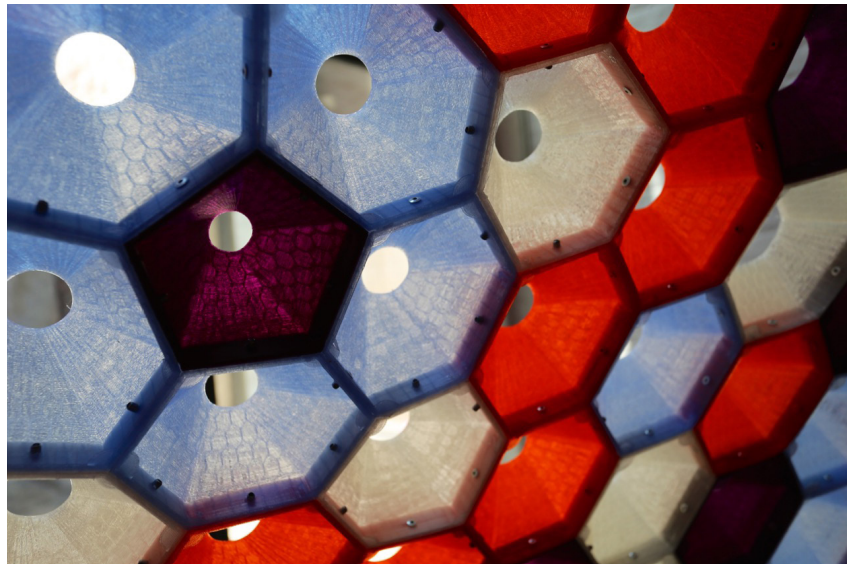
**Figura 3.11.** Impressão 3D em cerâmica.  
Cool Brick - agregação. Virginia San  
Fratello & Ronald Rael.





**Figura 3.12.** Impressão 3D em PLA. Star Lounge - interior.

**Figura 3.13.** Impressão 3D em PLA. Star Lounge - pormenor.



### 3.2.2. Polímeros

Os polímeros usados em processos de fabricação aditivos são materiais fortes, flexíveis e duráveis e que podem ter ainda várias cores. O nylon e as poliamidas são frequentemente utilizadas em processos de sinterização ou extrusão em formato de pó ou filamento, respectivamente.

Os polímeros em forma de pó podem ser misturados com pó de alumínio formando um outro material, o *Alumide*. Existe ainda um outro filamento composto, o WPC, uma mistura de fibras de madeira com vários plásticos como PP, PE e PVC. É um material sobretudo utilizado por impressoras de uso comum, de secretária.

Os termoplásticos usualmente mais utilizados nesta técnica são o ABS, um filamento caracterizado pela sua rigidez e o PLA, biodegradável, que pode ser usado sob a forma de resina por processos de DLP ou SL mas também, e sobretudo, enquanto filamento, para FDM.

### 3.2.3. Metais

À medida que cresce a procura por ferramentas de produção aditiva, tal como referido anteriormente, cresce também o interesse pela utilização de materiais de elevada resistência, mas cujos pontos de fusão elevados dificultam a sua utilização em processos de extrusão ou deposição. Os materiais metálicos são exemplo disso. Em fabricação aditiva os mais comuns são os derivados do alumínio e do cobalto.

No entanto, pela sua resistência, o mais utilizado é o aço inoxidável em forma de pó em processos de DMLS ou SLM. Também o titânio, metal de extrema resistência pode ser utilizado por processos aditivos.

Nos últimos anos também o ouro e a prata começaram a ser utilizados por esta técnica, sobretudo pela indústria da joalheria, também sob a forma de pó.

### 3.2.4. Papel

O papel de impressão estandardizado pode ser usado como material para fabricação aditivo.

A Mcor Technologies, uma empresa que opera na área do fabricação aditivo, tem como principal conceito o de que o tradicional papel de impressão é o material certo para a produção de modelos tridimensionais.

Figura 3.14. Impressão 3D em papel.

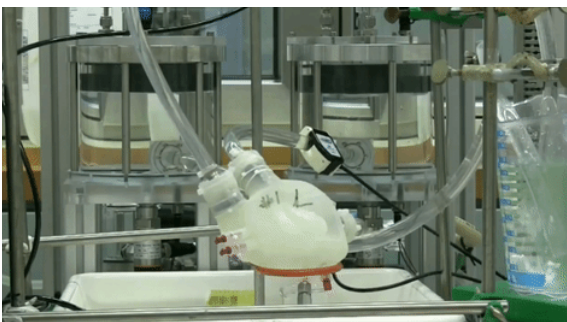




**Figura 3.15.** impressão 3D de material biológico. Tecido humano concebido para testar cosméticos.

**Figura 3.16.** Coração artificial impresso em 3D - pormenor.

**Figura 3.17.** Coração artificial impresso em 3D - em funcionamento.





Afirmam que, pelo simples facto de usarem o papel comum para o fabrico, à venda em qualquer lado, conseguem que esta seja a técnica e o material de produção mais baratos, o que permite a utilização da cor em todo o modelo, que é seguro e amigo do ambiente.

### **3.2.5. Bio materiais**

Atualmente existe um grande número de estudos em desenvolvimento que tentam aferir a possibilidade da utilização de processos de fabrico aditivos com base em materiais biológicos, sobretudo para aplicações médicas, olhando à produção de órgãos artificiais.

Estas investigações centram os seus esforços na impressão de órgãos perfeitamente funcionais para transplantes ou até mesmo tecidos exteriores do corpo.

Recentemente Cientistas do Instituto Federal de Tecnologia de Zurique, divulgaram imagens de testes de um coração artificial funcional em silicone, produzido através de uma impressora 3D.



## 3.3. Aplicações

Em igual proporção ao aumento de materiais e formas de fabrico também as suas aplicações aumentam. Atualmente, as ferramentas de fabrico aditivo permitem a rápida execução de modelos simples para teste e desenvolvimento ou, a nível profissional, de peças perfeitamente consolidadas e totalmente funcionais.

Trabalhando no sentido de aumentar os níveis de produção e baixar o preço dos componentes, muitas empresas dos vários sectores, começaram a investir esforços no sentido de aplicarem estas técnicas nos processos de fabrico que normalmente operam.

Na Arquitetura e no Design as ferramentas de fabrico aditivo começam a firmar-se como uma verdadeira alternativa aos métodos de fabrico tradicionais. Quer para o desenvolvimento de protótipos, quer para o estudo funcional e espacial de um determinado projeto, esta é já uma tecnologia consolidada e perfeitamente integrada no meio.

Também a medicina, tal como já foi referido 3.2.5. *Bio Materials*, começa a olhar para o fabrico aditivo como uma oportunidade de desenvolver componentes biológicos perfeitamente funcionais e compatíveis com o corpo humano. Para além do fabrico de órgãos individualizados está também a ser estudada a utilização destes processos no fabrico de comprimidos.



## 3.4. Limitações

Apesar das inúmeras vantagens, os processos de fabrico aditivo têm ainda algumas limitações que podem dificultar a sua aplicação em contexto industrial.

Os constrangimentos relativamente ao tamanho, resistência, durabilidade, qualidade e tempo de fabrico, são ainda um grande entrave à integração destas tecnologias na produção de bens de consumo generalizado.

Ainda que sejam capazes de produzir objetos com margens de erro de décimas de milímetro, é praticamente impossível produzirem dois objetos exatamente com a mesma forma e as mesmas características físicas.

A tecnologia ainda não está desenvolvida o suficiente para que o resultado final respeite os padrões requeridos a nível industrial. É certo que já é possível contornar estes problemas e desenvolver produtos de igual ou superior qualidade aos desenvolvidos pelos métodos tradicionais, no entanto, quando assim é, associado a este salto qualitativo, está também o aumento substancial do custo de produção, que inviabiliza tudo o resto.

Talvez por aqui se continue a entender o fabrico aditivo como um processo individualizado e talhado para a prototipagem.



## **4. Fabrico aditivo em cerâmica**





## 4.1. Impressora 3D

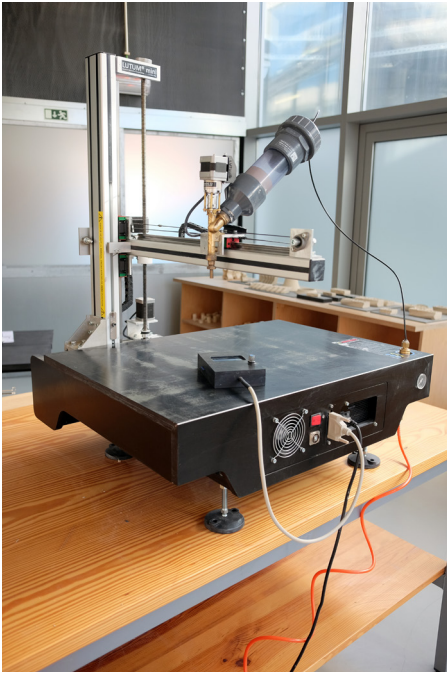
Para a produção dos elementos que servem de base ao estudo aqui efetivado foi utilizada uma ferramenta de fabrico aditivo de cerâmica, lançada em setembro de 2015 por Yao VD Heerik e Marlieke Wijnakker, com o nome de Lutum® Mini.

Integrada no conjunto de equipamentos que constituem o Laboratório de Cerâmica Avançada do Instituto de Design de Guimarães (*Advanced Ceramics R&D Lab*), esta ferramenta de fabrico aditivo serviu toda a produção dos protótipos em teste de seguida apresentados.

O funcionamento do equipamento é bastante simples. Três servomotores controlam as coordenadas X, Y e Z de uma cabeça de impressão que conta com um outro servomotor conectado a um fuso com duas nervuras helicoidais. Este fuso em conjugação com a pressão de ar exercida no cartucho de cerâmica, acoplado à cabeça de impressão, tornam possível a extrusão da pasta cerâmica através de pontas de medida variável.

Para fabricar um determinado componente com esta tecnologia é necessária a criação de um código de controlo numérico (G-code) referente a cada um dos elementos a produzir. Este código contém todas as instruções que a máquina necessita para saber como produzir um determinado objeto. Informa para onde e a que velocidade se deve mover a cabeça de impressão e qual a velocidade de rotação do fuso para que seja extrudida a quantidade exata de material, em função da altura e espessura de cada camada.

O código de controlo que dá as instruções a seguir pela máquina consiste na listagem das coordenadas no espaço dos pontos que formam as secções horizontais do modelo tridimensional digital em intervalos pré-definidos. Existem vários programas CAM, especificamente desenvolvidos para este efeito, que assistem a produção de objetos pela sucessiva sobreposição de material em camadas. Para além de seccionarem o objeto tridimensional digital em camadas sequenciais, estes programas permitem ainda a criação de estruturas de suporte, em situações onde a geometria do objeto



**Figura 4.1.** Impressora 3D Lutum® Mini.

**Figura 4.2.** Parte de um código de controlo numérico utilizado pela impressora.

```

M107
G28 ; home all axes
G1 Z5 F5000 ; lift nozzle
G21 ; set units to millimeters
G90 ; use absolute coordinates
M82 ; use absolute distances for extrusion
G92 E0
G1 F3600 E-1
G1 X181.459556157582 Y66.0920406713725 F2400
G1 Z1.5 F500
G1 E0 F3600
G1 X179.624119915501 Y65.3525334144783 Z1.5 E1.25975088527738 F2000
G1 X177.788679819856 Y64.6130359478167 Z1.5 E2.51950171685299
G1 X175.953235864051 Y63.8735482808264 Z1.5 E3.77925249641207
G1 X174.117788041488 Y63.1340704229463 Z1.5 E5.03900322564002
G1 X172.282336345572 Y62.3946023836153 Z1.5 E6.29875390622231
G1 X170.446880769707 Y61.6551441722722 Z1.5 E7.55850453984451
G1 X168.611421307294 Y60.9156957983558 Z1.5 E8.81825512819238
G1 X166.775957951739 Y60.176257271305 Z1.5 E10.0780056729517
G1 X164.940490696445 Y59.4368286005585 Z1.5 E11.3377561758084
G1 X163.105019534814 Y58.6974097955553 Z1.5 E12.59750666384486
G1 X161.269544460252 Y57.9580008657341 Z1.5 E13.8572570625585
G1 X159.43406546616 Y57.2186018205339 Z1.5 E15.1170074498242
G1 X157.598582545943 Y56.4792126693933 Z1.5 E16.3767578019323
G1 X155.763095693004 Y55.7398334217514 Z1.5 E17.6365081205692
G1 X153.927604900746 Y55.0004640870469 Z1.5 E18.8962584074216
G1 X152.092110162574 Y54.2611046747186 Z1.5 E20.1560086641761
G1 X150.25661147189 Y53.5217551942054 Z1.5 E21.4157588925198
G1 X148.421108822099 Y52.7824156549461 Z1.5 E22.6755090941395
G1 X146.585602206603 Y52.0430860663796 Z1.5 E23.9352592707223
G1 X144.750091618806 Y51.3037664379447 Z1.5 E25.1950094239555
G1 X142.914577052111 Y50.5644567790802 Z1.5 E26.4547595555264
G1 X141.079058499923 Y49.825157099225 Z1.5 E27.7145096671224
G1 X139.243535955644 Y49.0858674078179 Z1.5 E28.974259760431
G1 X137.408009412679 Y48.3465877142977 Z1.5 E30.23400983714
G1 X135.57247886443 Y47.6073180281034 Z1.5 E31.4937598989372
G1 X133.736944304301 Y46.8680583586736 Z1.5 E32.7535099475104
G1 X131.901405725696 Y46.1288087154473 Z1.5 E34.0132599845477
G1 X130.065863122018 Y45.3895691078632 Z1.5 E35.2730100117372
G1 X128.23031648667 Y44.6503395453603 Z1.5 E36.5327600307672
G1 X126.394765813057 Y43.9111200373774 Z1.5 E37.792510043326
G1 X124.559211094581 Y43.1719105933532 Z1.5 E39.0522600511022

```

é complexa ou existam inclinações bastante acentuadas. Estas estruturas de suporte são normalmente executadas num material mais pobre.

Com uma área de impressão limitada a aproximadamente 450 milímetros em cada direção (X, Y e Z) é apenas capaz de produzir elementos de escala reduzida. Para além das limitações métricas, há ainda questão da velocidade de impressão que influencia a estabilidade do conjunto, levando a vibrações excessivas, e que pode conduzir a erros na leitura do código de controlo.



## 4.2. Material

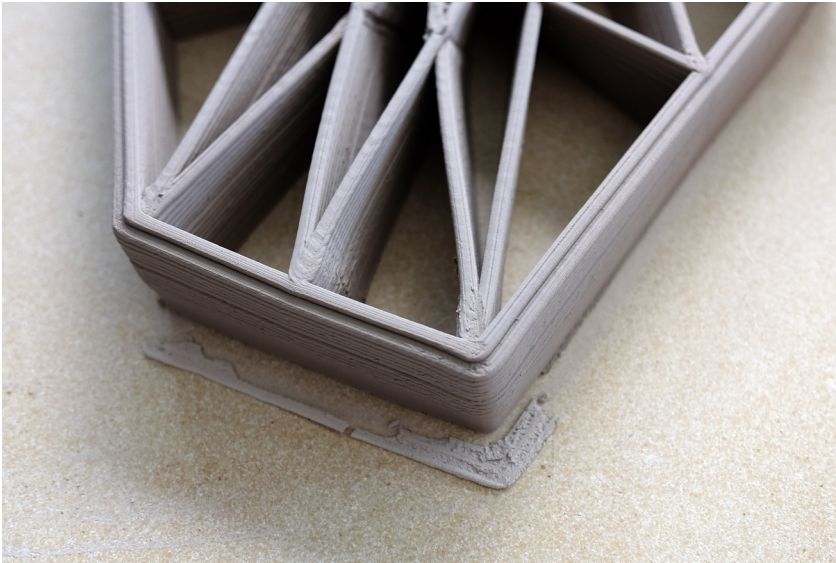
As propriedades dos materiais cerâmicos permitem uma grande variedade de aplicações na arquitetura. Dureza, densidade, durabilidade, capacidade de ter uma ampla gama de aparências e acabamento, entre outras propriedades facilitaram a aplicação de cerâmica em edifícios de todo o mundo durante séculos (Bechtold, 2015).

O material utilizado pela impressora para a concepção dos protótipos é uma pasta cerâmica, uma mistura de grés e água. Em função da quantidade de água presente na mistura obtemos diferentes tipos de pasta que servem diferentes propósitos. Para objetos de geometrias simples, em que a inclinação das laterais não é muito acentuada, pode ser utilizada uma mistura mais húmida para garantir uma melhor ligação entre camadas, vertical e horizontalmente. Por oposição, quando o objeto a executar tem uma geometria complexa e há lugar a inclinações laterais consideráveis, é aconselhável a utilização de uma pasta mais seca para que fique assegurada a integridade do modelo durante e após o processo de fabrico.

Seguindo a lógica anteriormente traçada é possível, embora não tenha sido alvo de estudo desta investigação, a integração de agentes químicos (adjuvantes) que aumentam a viscosidade da pasta ao mesmo tempo que permitem diminuir a quantidade de água, melhorando substancialmente as características da pasta fresca e após a cura. Para além dos aditivos químicos podem ainda ser adicionadas microfibras para auxiliar a interligação do material e impedir a fissuração durante o processo de cura e cozedura.

Uma vez o corpo de argila formado num elemento, ele seca até ao “estado verde”, naturalmente ou por meio de processos de secagem controlados por máquinas. Durante secagem e posterior cozedura, o encolhimento ocorre quando a humidade é removida. Da perspectiva do desenho, é importante entender a relação entre o corpo de argila e o encolhimento (Bechtold, 2015).

A cura é a fase que sucede a impressão e caracteriza-se pela desidratação do material, onde este perde a água presente na mistura.



**Figura 4.3.** Retração após cura à temperatura ambiente (dois dias depois da impressão).

<sup>4.1.</sup> Direção-Geral JRC Centro De Investigação Conjunta; Instituto de Estudos de Tecnologia Prospectiva. (2006). Documento de referência sobre as Melhores Técnicas Disponíveis na Indústria Cerâmica, 45–84.

<sup>4.2.</sup> idem.

Durante este processo, é necessário ter em atenção as variações térmicas a que a peça vai estar sujeita durante o tempo estimado de cura. Variações de temperatura excessivas podem resultar na fissuração das peças em zonas frágeis. Quando a temperatura ambiente é elevada e embora não seja previsível uma grande variação térmica, é aconselhável o isolamento da peça, cobrindo-a com um pano húmido, abrandando a desidratação do material para o ritmo normal.

Após a fase de cura, as ligações químicas entre os constituintes da pasta são ainda relativamente frágeis, e para que esta assuma níveis de resistência que permitam a sua utilização em contexto real é necessária a cozedura do material. “A cozedura é um processo essencial no fabrico de produtos cerâmicos, pois controla muitas propriedades importantes do produto acabado. Entre estas, podemos salientar a resistência mecânica, a resistência à abrasão, a estabilidade dimensional, a resistência a água e substâncias químicas e a resistência ao fogo.”<sup>4.1.</sup>

Geralmente, as peças de cerâmica são frágeis, têm uma força de compressão relativamente alta e comportam-se mal sob tensão (Bechtold, 2015).

Atingindo uma temperatura máxima de 1260° C (nos testes realizados), este processo conduz a alterações físico-químicas bastante importantes no material cozido, em que “toda a humidade residual é retirada a temperaturas entre 100 e 200° C. Se estiverem presentes matérias orgânicas e pirites de ferro, a oxidação tem lugar a temperaturas entre 300 e 500° C. A água combinada com a estrutura dos minerais argilosos (água de constituição) é normalmente libertada a temperaturas entre os 500 e os 650° C, enquanto carbonatos como a calcite e a dolomite se dissociam com a libertação de dióxido de carbono no intervalo de temperaturas de 750 a 950° C.”<sup>4.2.</sup>

Finalizado este processo de cozedura o material apresenta níveis de resistência bastante superiores aos anteriores, sendo que a sua resistência mecânica efetiva estará sempre dependente da geometria da peça em questão.





## 4.3. Processo de fabrico

O processo de fabrico utilizado na execução dos modelos começa com a acoplagem do cartucho à cabeça de impressão. A este é ligada uma mangueira que injeta ar no cartucho, pressionando a pasta, conferindo-lhe a consistência necessária.

Para que a extrusão se faça de forma satisfatória é necessária a coordenação de três parâmetros: a pressão de ar aplicada no cartucho, a velocidade de rotação do fuso e a viscosidade da pasta. Todos estes fatores influenciam o resultado da impressão na medida em que condicionam a forma como a extrusão é feita. A pressão de ar é controlada manualmente através de um manómetro na lateral do equipamento, enquanto que a velocidade de rotação do fuso (fluxo), embora possa ser controlada manualmente a partir do controlador, tem já o seu valor definido no código que informa a máquina.

Quando a velocidade de rotação do fuso é muito superior à pressão exercida no cartucho, ou seja, há uma discrepância entre o fluxo de material que se tenta extrudir e aquele que efetivamente entra na cabeça de impressão, a extrusão começa a ter quebras e a espessura da camada é reduzida. Em sentido inverso, quando o fluxo de saída de material é inferior ao que entra (menos velocidade e mais pressão), há a tendência para o aumento exponencial da espessura da camada, afetando ainda a altura da mesma uma vez que pressiona a camada anterior com mais material do que seria normal.

Para além desta coordenação entre entrada e saída de material deve ter-se em consideração a composição da pasta, que faz variar a sua viscosidade e a forma como as diferentes camadas se comportam entre si. Tal como já foi referido no ponto anterior, quanto mais viscosa e húmida é a mistura melhor é a ligação e menor é o risco de quebra entre camadas, no entanto, a utilização de uma pasta com elevado teor de água pode comprometer a integridade do modelo durante e após a impressão, uma vez que a mistura pode não garantir a consistência necessária para executar determinadas geometrias.

Durante a fase impressão, a primeira camada impressa, aquela que está em contacto direto com o suporte e serve de base a

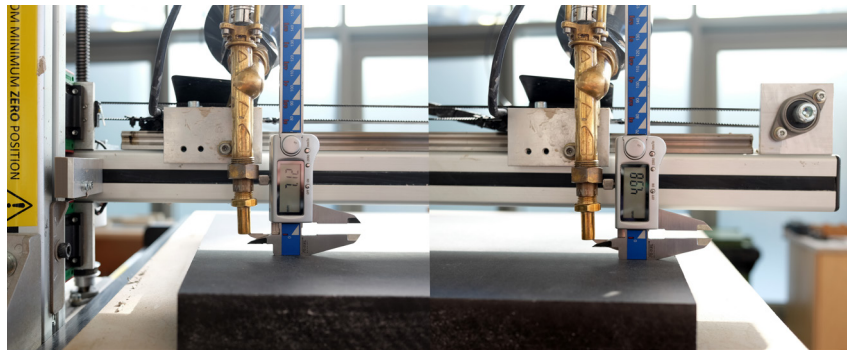
todo o modelo, será porventura a camada mais importante. É ela que serve de guia às camadas que a sucedem e sendo uma das linhas de contorno do objeto tem particular importância na determinação da correspondência ou não correspondência entre modelo digital e modelo físico. O principal problema com esta primeira camada está relacionado com variações altimétricas em diferentes partes da impressão. Uma das causas para problemas associados a esta variação de alturas é a flexão do braço horizontal da impressora pelo peso exercido pelo cartucho, fazendo com que à medida que a cabeça de impressão se afasta do braço vertical, a posição da ponta em “Z” vai baixando.

Para além deste último, qualquer deformação no suporte de impressão pode causar essa mesma variação. Esta oscilação altimétrica do suporte, que resulta em valores distintos dos estipulados no código de controlo da impressão, pode também causar variações na espessura da camada uma vez que a quantidade de material extrudido é calculada em função da altura da camada predefinida no código. Nas situações em que a altura da camada é bastante inferior à programada é frequente a ocorrência de quebras durante a fase de cura.

O suporte, material sobre o qual a impressão é feita, deve ser rugoso o suficiente para haja fixação do material na altura da primeira passagem, mas não em demasia para que na fase de cura, em que há a retração do material, não exista demasiado atrito, que pode causar fissuras superficiais. Nos testes executados durante esta investigação, como suporte de impressão, foram utilizadas placas de cerâmica refratária humedecidas.

**Figura 4.4.** Acoplamento do cartucho de cerâmica à cabeça de impressão.

**Figura 4.5.** Flexão do braço da impressora provocada pelo peso do cartucho.





## 5. Módulo 1 - Sistema para FA de paredes de alvenaria cerâmica

<sup>5.1.</sup> Com participação direta neste estudo estiveram: da EAUM, os docentes Bruno Figueiredo e Paulo Cruz; do Lab2PT, o docente Paulo Mendonça e o bolseiro de investigação Ivo Barbosa; do Institute of Structural Mechanics and Design, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Technische Universität Darmstadt, os investigadores Ulrich Knaack e Dennis de Witte.

O módulo 1, sistema para FA de paredes de alvenaria cerâmica, apresenta o primeiro caso de estudo desta investigação. Como referido no capítulo 1.3. *Organização da tese*, esta tarefa visa estudar capacidade e restrições que o fabrico aditivo de material cerâmico aporta para a conceção e produção de blocos cerâmicos e respetiva montagem em paramentos (ao nível das características dos materiais e ao nível formal). Em simultâneo, a aprendizagem resultante do desenvolvimento deste caso de estudo verteu para o processo implementado no caso de estudo sucedâneo: o *Módulo 2 – Sistema de cobertura*.

Importa referir que caso de estudo de seguida apresentado integra um conjunto de trabalhos de investigação desenvolvidos em parceria pelo Laboratório de Cerâmica Avançada, do Instituto de Design de Guimarães e pelo Institute of Structural Mechanics and Design, Faculty of Civil and Environmental Engineering da Technische Universität Darmstadt. *Ceramic 3D printing – The future of brick architecture*<sup>5.1.</sup>

Esta investigação apenas participa nos trabalhos de exportação dos códigos de controlo numérico (*G-Code*) e na produção dos blocos. Os resultados da análise dos vários indicadores em estudo permitiram à investigação tomar opções devidamente informadas no segundo caso de estudo.



## 5.1. Objetivo, desenho e função

Com o objetivo de explorar a integração de técnicas de fabrico aditivo nos processos de desenho e produção de blocos cerâmicos para o revestimento de edifícios, o projeto utiliza a impressora 3D Lutum® Mini presente no Laboratório de Cerâmica Avançada, do Instituto de Design de Guimarães, para a produção das peças.

Ao contrário dos processos de fabrico industriais (em massa), a impressão 3D em cerâmica permite maior liberdade formal, que pode ser usada para acelerar a exploração e teste de novas tipologias (Barbosa & Figueiredo, 2017).

O projeto de investigação compreende o desenho e produção de um protótipo à escala real de um sistema de revestimento de fachadas (100x50cm), com 50 componentes, todos eles diferentes, com o objetivo de testar as possibilidades do fabrico aditivo em cerâmica em contexto real.

Tendo em conta que a forma exterior do bloco responde maioritariamente, mas não em exclusivo, a requisitos formais, enquanto a estrutura interior responde principalmente a questões de performance, para a investigação, foi metodologicamente estabelecida uma divisão entre os dois elementos abstratos do bloco (Barbosa & Figueiredo, 2017).

Para as experimentações geométricas foi usado como referência um bloco com medidas padrão (210x100x50mm) no qual foi definida uma forma irregular livre que configura a superfície exterior do bloco.

Na determinação do desenho da forma exterior do bloco (superfície ondulada) foram testados os limites de inclinação permitidos pela pasta cerâmica e pela tecnologia (impressora 3D). Os testes de inclinação fizeram-se pela impressão sequencial de superfícies “lisas, semicurvas e curvas” (Cruz et al., 2017), com inclinações compreendidas entre 20° e 55°. Verificou-se que com inclinações superiores a 30° a deformação sofrida pela peça inviabiliza a impressão. Da análise dos resultados destes testes resultaram



**Figura 5.1.** Testes de *Pfefferkorn*.

**Figura 5.2.** Testes de inclinação.  
Modelos impressos.





princípios formais que regem a geração da superfície exterior dos blocos (inclinação máxima de 30°).

No desenho da estrutura interna do bloco foram considerados vários padrões, com o objetivo de estabelecer comparações de performance entre eles, sendo que para cada um destes padrões foram definidas algumas variáveis que poderiam ser adaptadas, tais como o número de células, nas direções U e V, a espessura das paredes de limitação das células e a capacidade de adaptação à forma exterior do bloco (Barbosa & Figueiredo, 2017).



## 5.2. Modelo computacional

A implementação de modelos computacionais teve dois objetivos. O primeiro na definição de soluções de projeto que implementam os resultados das análises feitas. A este nível, os modelos computacionais funcionam em dois momentos: (1) para a definição da forma global da parede, (a) da sua geometria, designadamente ao nível da superfície curva exterior e (b) da divisão da parede em componentes (blocos cerâmicos); (2) na definição da estrutura interna e espessura das paredes dos blocos cerâmicos, em consonância com a dimensão da ponta de extrusora a utilizar na sua produção.

Posteriormente, foi desenvolvido um segundo modelo computacional que executa a tradução da geometria dos componentes em linguagem *G-Code*, de acordo com as características de funcionamento da tecnologia de fabrico (espessura e altura da camada). Neste caso foi utilizada uma ponta extrusora de 3mm para uma camada com 1,5mm de altura.

O desenho dos blocos começa com a determinação da superfície exterior do conjunto, em *Grasshopper*<sup>®</sup> (editor algorítmico gráfico), decorrente da análise dos testes de curvatura anteriormente descritos. Posteriormente é desenhada uma malha de blocos convencionais e é feita a interseção entre estes e a superfície curva inicial. Para finalizar é subtraída a superfície exterior dos blocos, sendo substituída pelo resultado da interseção anterior.

Após a determinação do contorno de cada um dos componentes da parede, é estabelecido um conjunto de modelos paramétricos para a geração da estrutura interior dos blocos. Para a definição desta estrutura interior, como já foi referido anteriormente, são criados vários padrões configuráveis que se adaptam, ou não, à geometria de cada um dos blocos, permitindo ainda outras variações, relativas às configurações da impressora 3D.

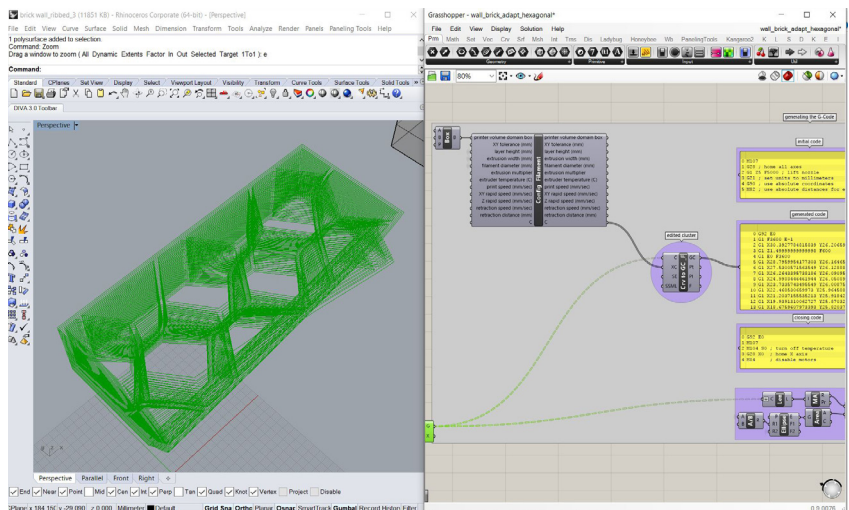
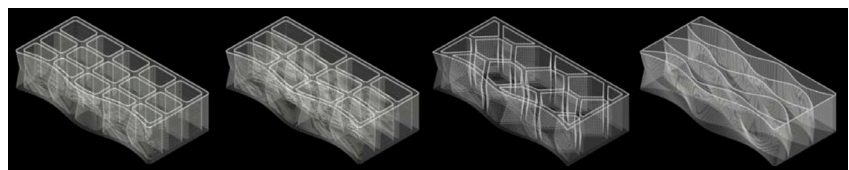
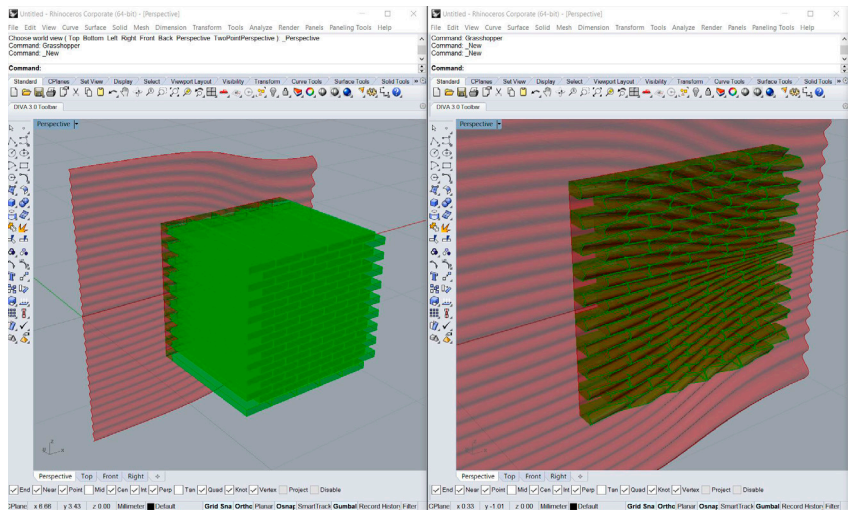
Pela ausência de um programa informático específico para esta impressora, e pelo controlo limitado oferecido pelos programas de fabrico aditivo genéricos, a solução foi interpretar o código lido pela máquina e utiliza-lo como ponto de partida. Visto que parte

da informação necessária para a impressão já estava presente nos modelos digitais (*Rhinoceros*® e *Grasshopper*®), o objetivo foi desenvolver um código em *Grasshopper*® com a capacidade de transformar a volumetria inicial do bloco em geometrias imprimíveis (caminhos de impressão) que pudessem ser traduzidos para *G-code*. Usando como referência um código desenvolvido por Ryan Hoover, foi criado um novo código que converte os caminhos gerados em coordenadas X, Y e Z, transformando-as em informação textual, em função da definição das características da tecnologia de fabrico a utilizar (Barbosa & Figueiredo, 2017).

**Figura 5.3.** Estrutura dos blocos tradicionais (à esquerda) e blocos personalizados (à direita).

**Figura 5.4.** Diferentes padrões para a estrutura interna.

**Figura 5.5.** Conversão das linhas de contorno em G-Code.





## 5.3. Pasta cerâmica

Na produção de materiais de base argilosa, a plasticidade é uma propriedade essencial e determina como a pasta cerâmica é convertida na forma desejada pela aplicação de pressão (Cruz, 2017 apud Andrade, 2011).

A quantidade de água presente na pasta é uma das variáveis mais importantes para a concordância ou não concordância formal entre o modelo impresso e o modelo digital no qual se baseia. Para a determinação da quantidade exata de água para a obtenção de resultados satisfatórios durante a produção, foram conduzidos testes que visavam a obtenção desse valor, recorrendo ao método *Pfefferkorn*<sup>2</sup>.

O método de *Pfefferkorn* foi adotado para comparar a plasticidade de três materiais cerâmicos diferentes: (1) Gres-130-MP, uma pasta cerâmica normalmente em processos manuais e mecânicos, com plasticidade original variável; (2) Gres-Art13-AT, um pó cerâmico normalmente utilizado para colar peças cerâmicas; (3) Creaton No. 208, um pó cerâmico normalmente utilizado em trabalhos manuais e mecânicos (Cruz et al., 2017).

Para os testes com o pó cerâmico foi adicionada água até que esta atingisse 20% do conteúdo da mistura. Mais tarde foi adicionada mais água e foram feitos os testes de *Pfefferkorn*. O peso de cada provete foi registado antes e depois da desidratação para ser possível calcular o conteúdo de água de cada um deles. Os testes decorreram até que a altura dos modelos descresse até 70% da altura inicial. Posteriormente foram feitos testes de impressão para aferir as qualidades de cada pasta ao nível da impressão.

Após a impressão de uma série de modelos cilíndricos, com pastas de plasticidade variada (testadas pelo método *Pfefferkorn*), concluiu-se que com uma percentagem de água de 35% é possível obter superfícies de boa qualidade, e que resultam em deformações que variam entre 12,5% e 17,5%.





## 5.4. Configurações da impressora

A observação detalhada de um vasto número de impressões torna possível o desenvolvimento de conhecimento e critérios de análise na deteção de imperfeições e defeitos, as causas e como evita-los. Para avaliar as discrepâncias dimensionais entre modelos impressos e modelos digitais e correlaciona-los com os parâmetros, as medidas relativas à altura, largura e espessura da camada estes são associados aos valores atribuídos à velocidade de impressão, pressão e altura da camada (Cruz et al., 2017).

Pela impressão de vários exemplares do mesmo modelo digital e pela variação dos parâmetros que controlam a impressora 3D é possível aferir quais as implicações que cada um deles tem no resultado da impressão e nos desvios relativamente ao modelo de origem.

Tal como já foi referido em 4.3. *Processo de fabrico* os resultados sugerem que o aumento da velocidade de extrusão resulta na redução da altura e espessura da parede modelo impresso. Por oposição o aumento da pressão aplicada na pasta resulta no aumento das variáveis anteriores.

Os modelos impressos com alturas de camada mais altas (menos camadas) resultam em peças de geometria aproximada à do modelo digital, no entanto em comparação com modelos com camadas mais baixas (mais camadas), estes apresentam espessuras de parede relativamente mais baixas (Cruz et al., 2017).



## 6. Módulo 2 - Sistema de cobertura

O módulo 2, sistema de cobertura, apresenta o segundo caso de estudo desta investigação, constituindo-se este como principal elemento projetual de sustentação da mesma.

O projeto que aqui se expõe surge na tentativa de resolver um problema de sobreaquecimento do espaço interior do Laboratório de Cerâmica Avançada, do Instituto de Design de Guimarães (IDEGUI), onde em determinadas alturas do ano é manifesta a elevada temperatura provocada pela ausência de sombreamento no vão envidraçado daquele espaço.



## 6.1. Objetivo, desenho e função

Com o objetivo primário de aferir o potencial da utilização efetiva de ferramentas de desenho e fabrico digital na conceção de elementos arquitetónicos, o projeto de seguida explanado consiste na criação de uma estrutura abobadada constituída por blocos hexagonais irregulares.

Fazendo uso do programa computacional de modelação tridimensional *Rhinoceros*<sup>®</sup> e do editor algorítmico gráfico *Grasshopper*<sup>®</sup> é criada, em ambiente digital, uma estrutura arcada em forma de abóbada com a estrita função de sombrear o vão envidraçado anteriormente mencionado. Projetada sobre um pátio adjacente ao Laboratório de Cerâmica Avançada, do Instituto de Design de Guimarães, a estrutura constrói-se recorrendo ao fabrico aditivo de cerâmica através da impressora tridimensional *Lutum*<sup>®</sup> *Mini*, descrita em *4.1. Impressora 3D*.

Para o desenho da estrutura, tal como anteriormente referido, a investigação recorre ao desenho paramétrico para a execução dos modelos tridimensionais da abóbada, aplicando a lógica experimental que visa testar do potencial da utilização destas tecnologias em situações reais. Aqui, ainda em ambiente digital, são também introduzidas simulações performativas, de análise solar, que complementam e permitem adaptar o modelo às necessidades do problema que a solução procura responder.

A geometria da superfície curva que serve de base a toda a estrutura tem a sua origem na análise do problema, colocando-se perpendicularmente à direção que se procura sombrear, permitindo ainda assim a permeabilidade de todo o conjunto nas restantes direções.

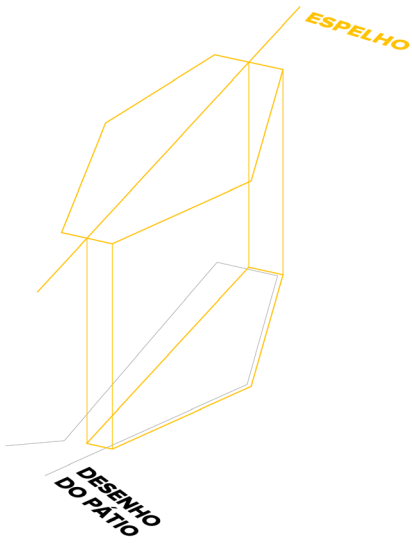
Com base numa malha hexagonal irregular, o padrão que cobre a superfície original e faz a divisão da estrutura em blocos, nasce da analogia criada entre o suporte (geometria do pátio) e a peça (geometria do bloco).



**Figura 6.1.** Esquema de funcionamento da estrutura de sombreamento.

**Figura 6.2.** Analogia entre suporte (edifício) e peça (bloco).

**Figura 6.3.** Ponto de atração que influencia a abertura dos blocos.



Esta malha hexagonal é posteriormente escalada para o interior, formando aberturas, elemento a elemento, fazendo variar o seu valor em função da posição da peça no conjunto, a partir da definição de um ponto no espaço que marca a direção a bloquear.

Por aqui se entende a lógica de desenho performativo utilizada na conceção do modelo, em que pela análise concreta do que acontece no espaço real, em confronto com os dados climatéricos da região (Porto), é definido um elemento (ponto no espaço) que faz variar a abertura (permeabilidade) cada uma das peças relativamente à posição que ocupa no conjunto.

A estrutura interna dos blocos assenta o seu desenho nas duas formas hexagonais anteriormente descritas, no contorno do bloco e na abertura variável desenhada a partir deste último. Pelo cruzamento de pontos iniciais, médios e finais é desenhada uma estrutura interna cruzada que para além de dar forma à abertura variável da peça, confere ainda a integridade estrutural da mesma e, posteriormente, de toda a estrutura.

Como já foi anteriormente referido a função desta estrutura limita-se ao sombreamento do vão envidraçado do Laboratório de Cerâmica Avançada na relação espaço/tempo em que os ganhos solares são manifestamente superiores aos necessários, e onde se verifica o sobreaquecimento do espaço.





## 6.2. Modelo paramétrico

### 6.2.1. Abóbada

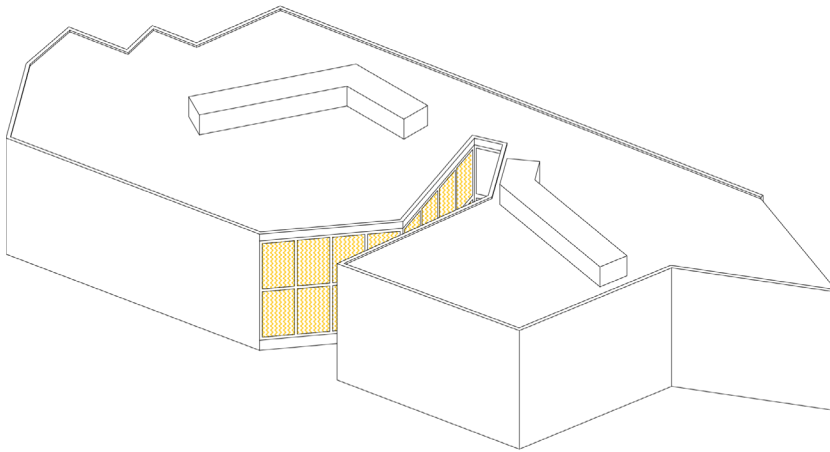
Após a criação do modelo tridimensional do suporte (edifício do IDEGUI) em *Rhinoceros*<sup>®</sup>, procede-se ao desenvolvimento do modelo paramétrico que gerência todo o projeto a partir do *Grasshopper*<sup>®</sup>.

Depois de definida a superfície que serve de base à estrutura da abóbada é criada uma malha hexagonal de dimensão variável que a divide em elementos mais pequenos (células). Como resultado desta divisão obtemos células hexagonais curvas que, com o *Kangaroo*, um utilitário do *Grasshopper*<sup>®</sup>, são planificadas tornando-se em células hexagonais planares (contorno inferior exterior dos blocos).

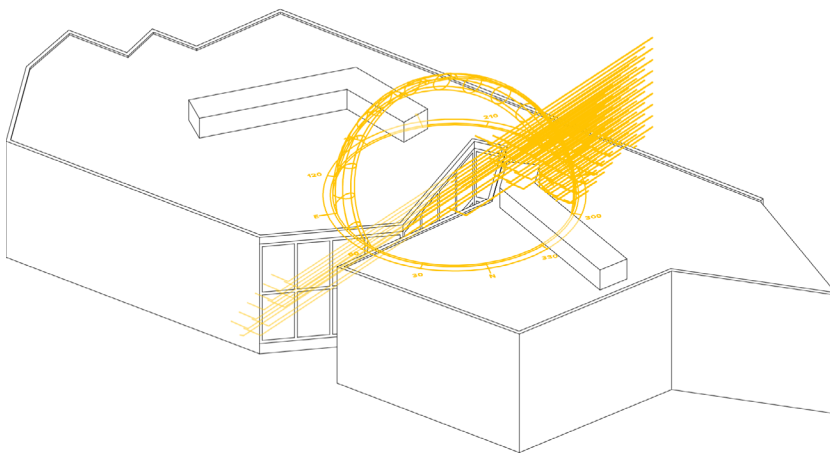
A partir da duplicação da superfície inicial, e da repetição de todo o processo anteriormente descrito obtemos uma segunda malha hexagonal de elementos planares que conferem o contorno superior de cada um dos blocos.

De seguida são descartados todos os elementos do desenho que tenham um número de faces inferior a seis unidades e, a partir do resultado desta clivagem, cada uma das células, superiores e inferiores, são escaladas para o seu próprio centro geométrico em função de critérios distintos. Durante a clivagem são também divididos os elementos que mais tarde irão formar as bases de sustentação da estrutura. As células que desenharam o contorno superior sofrem todas o mesmo valor de redução de escala, ao passo que as células que desenharam a silhueta inferior são escaladas em função da sua posição relativa no conjunto.

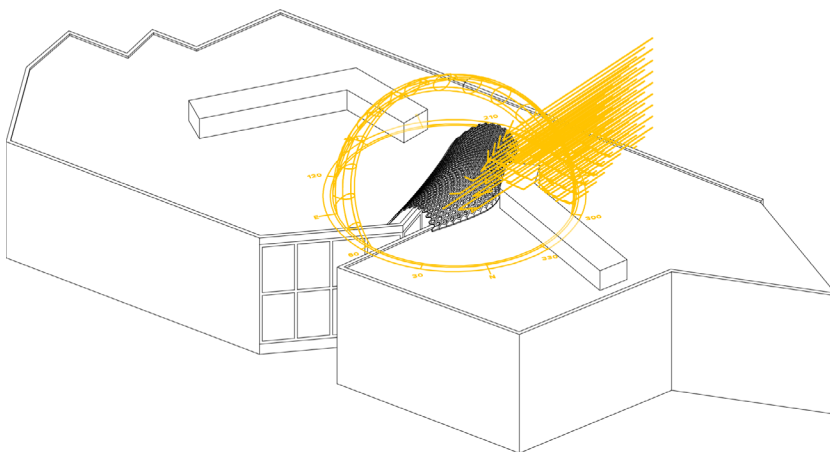
Para escalar o contorno inferior que irá definir a abertura de cada um dos blocos, a partir da análise dos dados climáticos da cidade do Porto (a mais próxima disponível), é criado um ponto de atração que simula a posição do sol naquela que é considerada a altura mais problemática do ano, 21 de junho às 17h00. Este ponto de atração vai fazer variar o valor da escala que cada elemento irá sofrer em função da distância entre eles, isto é, quanto mais próximo do ponto de



**Figura 6.4.** Modelo tridimensional IDEGUI. Vão envidraçado a sombrear (trama amarela).



**Figura 6.5.** Simulação da incidência solar do dia 21 de Junho às 17h00, sem portecção.



**Figura 6.6.** Simulação da incidência solar do dia 21 de Junho às 17h00, com a estrutura de sombreamento.

atração está a geometria inicial, mais pequena ela se torna, resultando numa abertura mais estreita, que garante maior bloqueio dos raios solares. Em sentido inverso, quanto mais distante do ponto de atração maior será a abertura e maior será a permeabilidade do bloco à luz.

Com as quatro geometrias resultantes dos processos anteriormente descritos, contorno exterior superior e inferior, e contorno interior superior e inferior é possível criar o volume de referência (contorno tridimensional) de cada um dos blocos que compõem a estrutura. Para além destes, também os blocos da base, anteriormente descartados, ganham forma.

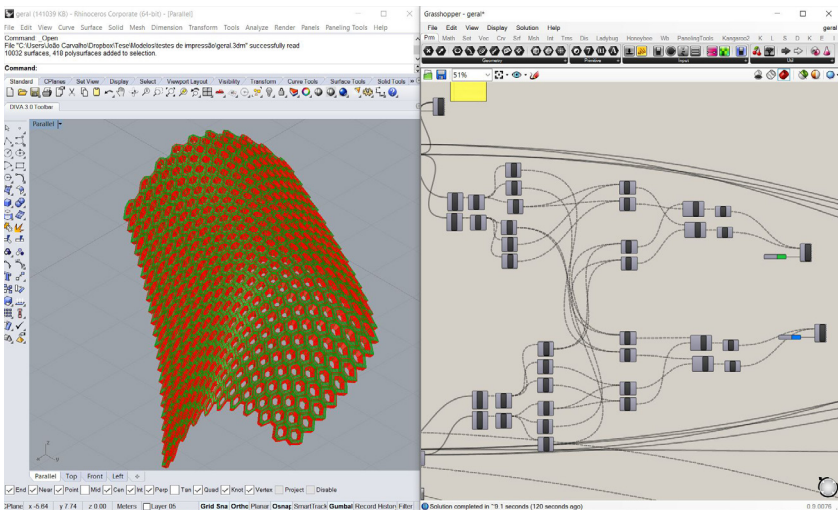
Para a definição da estrutura interna que irá dar forma à maior ou menor permeabilidade dos blocos, são utilizados pontos de referência de cada uma das quatro linhas de contorno que definem a silhueta do bloco. A partir dos pontos iniciais, médios e finais de cada segmento que compõe as polilinhas de contorno dos blocos é criada uma malha cruzada de linhas que para além de conformar a geometria de cada bloco, garante a integridade estrutural do conjunto, funcionando como uma treliça deitada que trava toda a estrutura.

Para finalizar a conceção das peças, há lugar à numeração e planificação de cada um dos blocos presentes na estrutura de modo a facilitar a sua produção e posterior montagem. Para tal a cada bloco do interior é dado um número de referência (1; 2; 3; ...), e aos blocos da base uma letra e um número dependendo da sua posição relativamente aos pontos cardeais (BN1; BN2; BN3; ... ou BS1; BS2; BS3; ...).

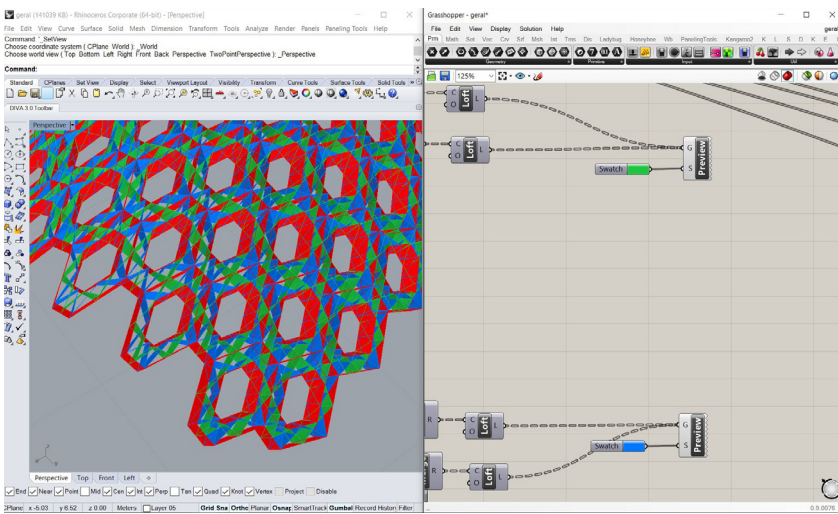
Para além do desenho da estrutura e exportação dos elementos peça a peça, a utilização de um modelo paramétrico permite também a criação do código de controlo (*G-Code*) que vai informar a produção (impressora 3D). A criação deste código consiste na “tradução da volumetria em coordenadas”<sup>6.1</sup> e caminhos a percorrer pela cabeça de impressão. Para isso as várias superfícies que constituem cada um dos blocos são referenciadas e seccionadas horizontalmente em intervalos constantes, sendo essas secções posteriormente desconstruídas em coordenadas referenciadas nos eixos X, Y e Z. Todas estas coordenadas são depois compiladas num único ficheiro de texto que contém também os valores da velocidade de impressão e fluxo de material a extrudir, entre outras informações.

### **6.2.2. Arcos de teste**

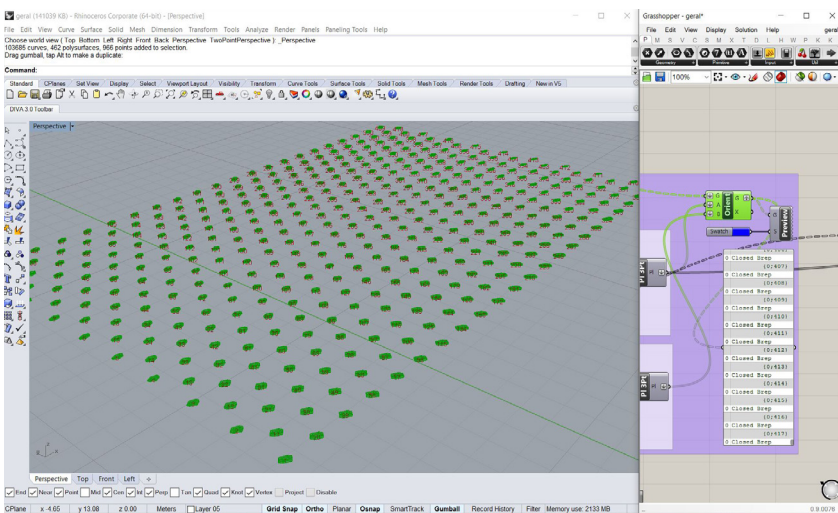
Dada a complexidade, dimensão e número de elementos que compõem a estrutura geral da abóbada, foram desenvolvidos dois arcos de teste, aproximadamente com metade da escala do modelo real, que simulam o comportamento dinâmico da estrutura, para além de permitirem estudar vários sistemas de ligação entre blocos.



**Figura 6.7.** Volume de referência de cada um dos blocos da abóbada (a verde).



**Figura 6.8.** Estrutura interna dos blocos da abóbada. Cruzamento de duas superfícies (verde e azul).



**Figura 6.9.** Planificação e numeração de todos os blocos da abóbada.

Com base num semicírculo de 1,5 metros de diâmetro desenha-se o arco que serve de contorno à superfície de geração dos blocos. Os dois arcos servem ainda para testar a orientação das peças e o seu sistema de agregação. Enquanto o Arco 1 segue a lógica aplicada no modelo geral, com peças mais alongadas e ligações diagonais, o Arco 2 apresenta uma geometria hexagonal regular e ligações horizontais. Ambos testam seis tipos de ligações onde existe a variação da geometria das superfícies que fazem o contacto entre as peças.

Uma vez que se tratam de estruturas que tentam simular o comportamento do modelo original, o processo que leva à sua criação acontece nos moldes descritos em 6.2.1. *Abóbada*, embora aqui o desenho paramétrico apenas seja utilizado para desenhar os contornos interiores e exteriores dos blocos. Tal acontece pelo elevado número de variações presentes ao longo dos arcos, tornando-os bastante complexos ao nível das ligações, dificultando a criação de um modelo paramétrico que lhes dê resposta. Assim sendo, todas as variações formais das superfícies laterais dos blocos foram desenvolvidas em Rhinoceros®, tal como a estrutura interna de cada um deles.

Também permeabilidade das peças dos arcos de teste simula o que acontece no modelo geral da abóbada, sendo que os valores utilizados para a determinação das aberturas são os mesmos do modelo inicial. Aqui, o ponto de atração que faz variar o grau de abertura dos blocos encontra-se de um dos lados do arco, fazendo com que, em cada arco, haja uma peça com a abertura máxima e do lado oposto uma peça com a abertura mínima, permitindo estudar as implicações que essas variações geométricas podem ter no conjunto.



## 6.3. Produção

### 6.3.1. Modelos iniciais

O desenvolvimento destes modelos iniciais justifica-se pela necessidade de testar e compreender quais as melhores configurações e quais as implicações que estas teriam na execução das peças finais. Para as impressões foram utilizados os blocos do arco de teste 1 à escala real. Nestes ensaios, onde as variáveis relacionadas com a impressão tiveram particular preponderância, foram também alvo de estudo questões de desenho e alterações ao código de controlo (*G-Code*) que informa o equipamento.

Durante os testes de impressão iniciais foram testadas várias combinações de pontas extrusoras, pressão aplicada no cartucho, fluxo de material extrudido e velocidade de impressão.

Para além destas últimas variáveis foram também testadas alterações ao caminho percorrido pela cabeça de impressão, número de camadas e ordem de impressão das diferentes geometrias.

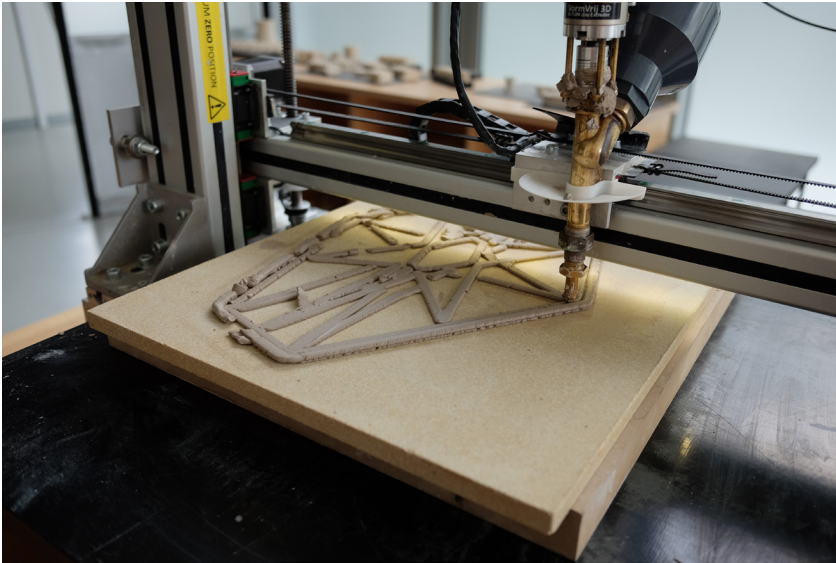
De seguida são apresentados e detalhados os testes de impressão iniciais que serviram de base à determinação das configurações ideais do equipamento e do código de controlo para a produção dos dois arcos de teste.

### 6.3.2. Arcos de teste

Finalizado o desenho dos blocos que constituem cada um dos arcos de teste procedeu-se à planificação e, posteriormente, à criação do código de controlo numérico de cada um deles.

Na execução deste código foram introduzidas algumas alterações que resultaram na não correspondência entre os modelos digitais originais e os modelos impressos. Apesar disto, todos os valores mais à frente apresentados, que serviram de comparação entre os dois tipos de modelos tem a sua origem em elementos

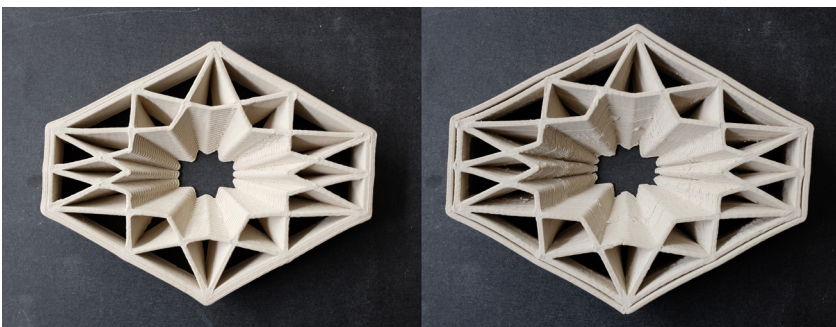
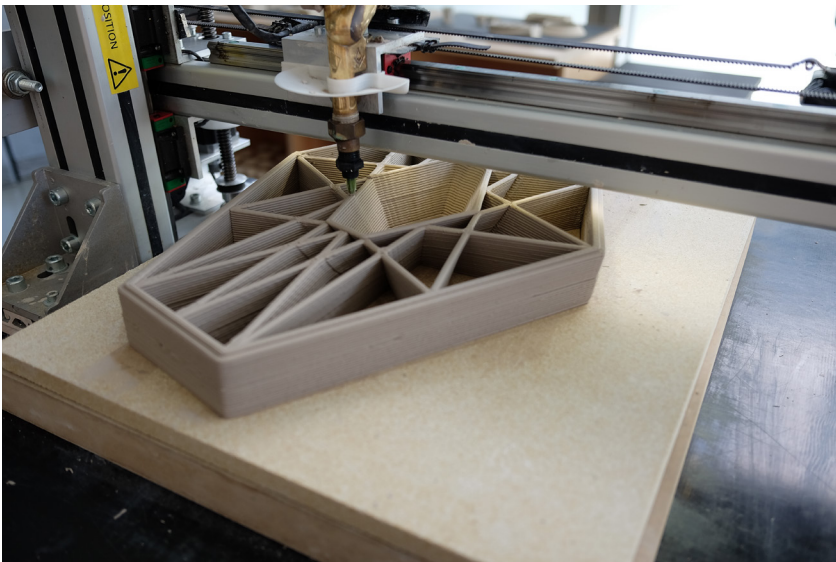




**Figura 6.10.** Impressão com a ponta extrusora de 8mm.

**Figura 6.11.** Impressão com a ponta extrusora de 3mm.

**Figura 6.12.** Diferentes caminhos percorridos durante a impressão. À esquerda impressão feita a partir de duas polilinhas interiores e de contorno exterior duplo. À direita impressão feita a partir uma polilinha interior e um contorno exterior.

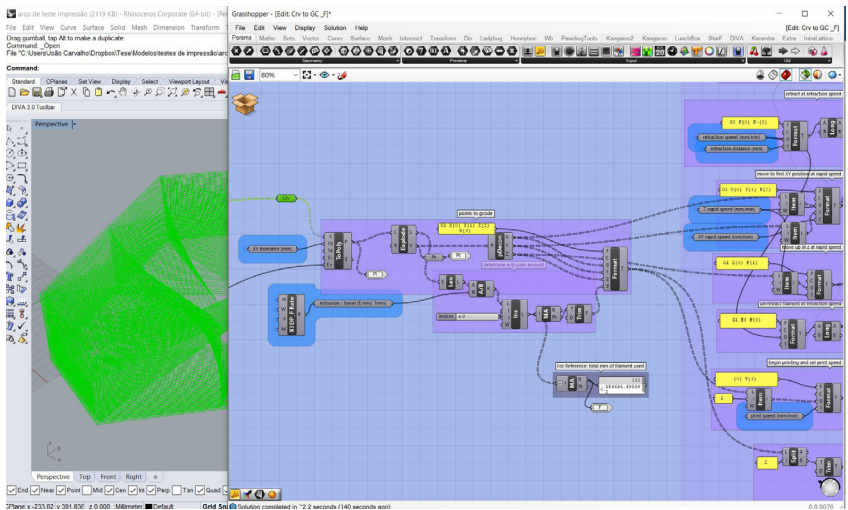




correspondentes. As alterações que foram feitas referem-se à altura dos blocos, onde pelo facto de estes não serem totalmente planares, haver a necessidade de excluir algumas camadas do modelo, para que este seja totalmente plano, suprimindo possíveis erros durante impressão.

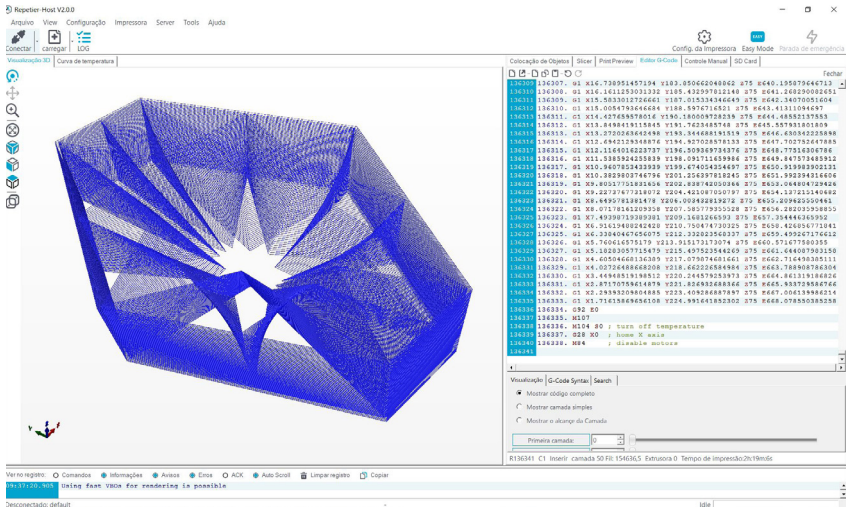
Depois da leitura da geometria e sequente tradução em coordenadas, o código é guardado num ficheiro individual com a extensão requerida pela máquina (.gcode), através do Repetier-Host, um programa informático que permite a edição do código de controlo numérico.

A preparação do equipamento para a impressão dos blocos e de todas as variáveis a ela inerentes seguem os princípios descritos em 4.3. *Processo de fabrico*. Neste caso em particular, após a cura dos blocos (perda da água higroscópica), as peças são submetidas a um processo de suavização superficial, recorrendo a ferramentas abrasivas, na tentativa de melhorar correspondência física entre modelos físicos e digitais.



**Figura 6.13.** Parte do código que traduz a geometria das peças em coordenadas.

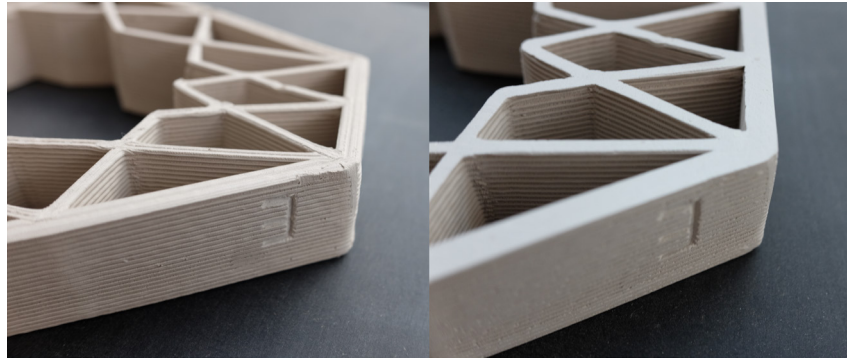
**Figura 6.14.** Exportação do G-Code a partir do *Repetier Host*.



**Figura 6.15.** Suavização superficial das peças. À esquerda antes da suavização, à direita depois da suavização.

**Figura 6.16.** Estufa utilizada para acelerar o processo de desidratação dos blocos cerâmicos.

**Figura 6.17.** Forno para a cozedura dos blocos cerâmicos.





## 6.4. Resultados

### 6.4.1. Modelos iniciais

Para a execução dos testes de impressão iniciais, e para que houvesse concordância geométrica entre os vários testes, foi apenas considerada uma parte do arco 1 à escala real – compreendendo as peças 9, 10, 18 e 19 - por aparentarem ser as potencialmente mais problemáticas, tendo em conta o seu grau de abertura.

Da análise dos resultados dos testes de impressão dos modelos iniciais verificou-se que se tivermos apenas em conta a fidelidade geométrica do modelo físico ao modelo digital, obtemos melhores resultados quando é utilizada a ponta extrusora de 3mm. Por sua vez, as pontas de maior diâmetro garantem, à partida, uma maior rigidez estrutural, tanto da peça, como do conjunto da agregação.

Ainda assim, e pela observação dos blocos após a cura e decorrente cozedura, a maior concentração de material que existe nos casos em que são utilizadas as pontas de 6 e 8mm, resulta em tensões substancialmente superiores, resultando na quebra pontual e aleatória da peça. Em boa verdade tais roturas superficiais também acontecem quando é utilizada a ponta extrusora de 3mm, no entanto, estas manifestações ocorrem em partes sensíveis da geometria da peça, sendo previsíveis e conseqüentemente possíveis de evitar. (*Figuras 6.25, 6.26 e 6.27*)

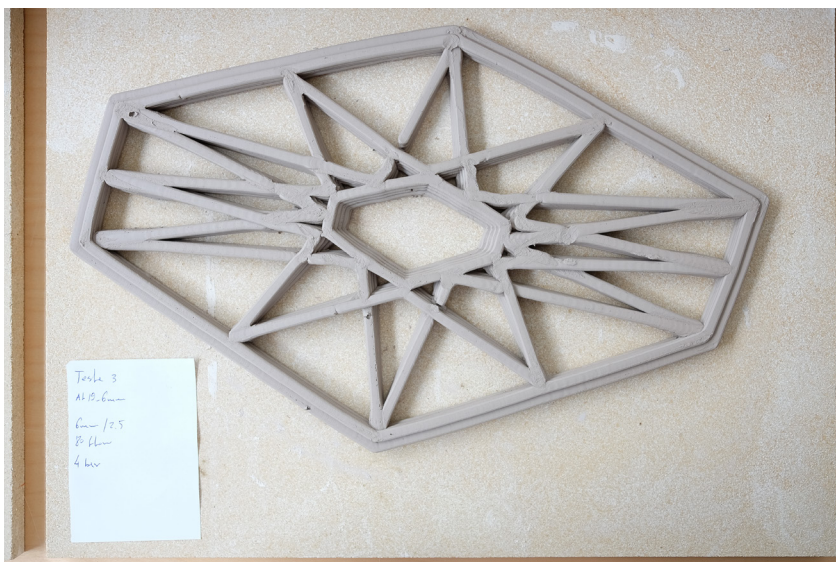
A retração do material pela desidratação será porventura o principal problema encontrado durante a execução destes testes. A *Figura 6.28* é um bom exemplo do que acontece logo após a impressão da peça, onde se vê claramente a diferença de dimensão entre o bloco inicialmente impresso e o bloco depois de perder a água presente na pasta cerâmica.

Esta perda de volume que resulta também na perda de concordância entre as escalas dos modelos digitais e físicos, provoca ainda alterações ao nível da forma, afastando ainda mais a peça final (física) da peça original (digital). Na *Figura 6.29* é perceptível a

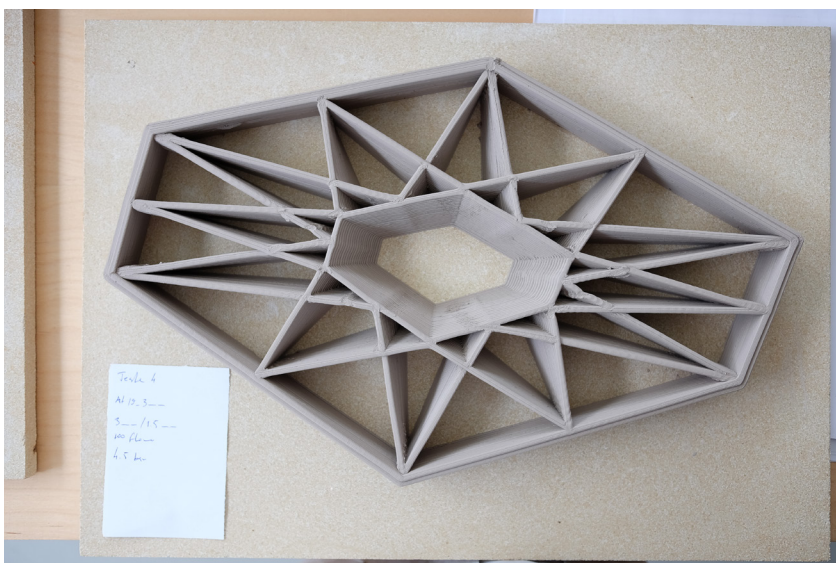




**Figura 6.18.** Teste de impressão 2 - Peça 19, ponta extrusora de 8mm. Após cura à temperatura ambiente.



**Figura 6.19.** Teste de impressão 3 - Peça 19, ponta extrusora de 6mm. Após cura à temperatura ambiente.



**Figura 6.20.** Teste de impressão 4 - Peça 19, ponta extrusora de 3mm. Após cura à temperatura ambiente.

deformação provocada pela retração na estrutura interna da peça. Aqui, nota-se claramente a existência de forças a trabalhar em sentidos opostos ou com intensidades distintas, levando a alterações formais consideráveis.

As quebras anteriormente mencionadas, para além de terem origem na retração do material quando este perde humidade, estão também relacionadas com a forma como essa humidade é extraída da peça. Tal como já foi referido em 4.2. *Material*, variações bruscas de temperatura resultam em perdas diferenciadas ao longo do tempo e ao longo do modelo impresso, fazendo com que pela diferença dos valores de retração que vão pontuando o modelo em função da variação de massa no mesmo, haja lugar a quebras ou roturas totais na superfície dos blocos.

#### **6.4.2. Arcos de teste**

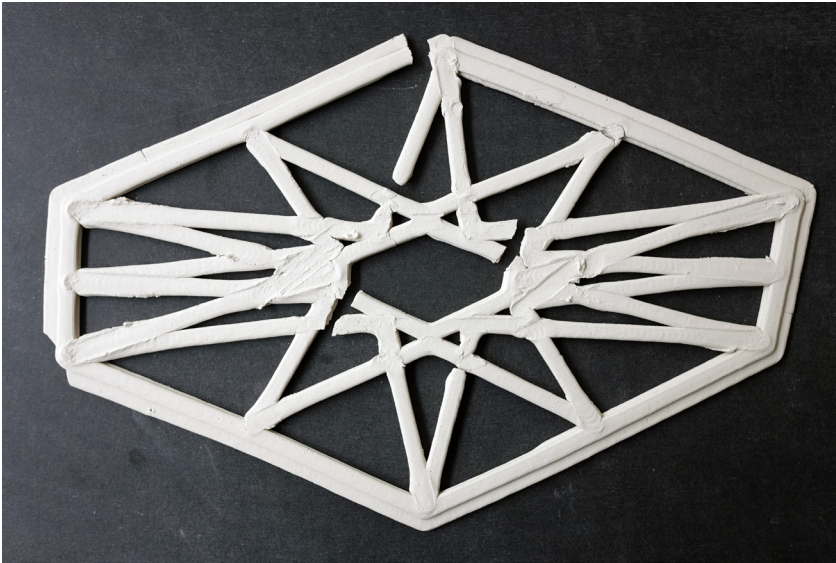
Após a impressão dos blocos, foram analisadas e registadas as características físicas de cada um deles em duas fases distintas, depois da cura à temperatura ambiente e após a cozedura, para a posterior comparação com os modelos tridimensionais digitais nos quais se baseiam.

Para o registo dos dados de cada uma das impressões realizadas foram consideradas várias propriedades físicas em diferentes estados da produção. Foram registados os valores da espessura da camada, da altura da camada, do peso, da altura do bloco (Z) e da largura em duas dimensões referenciais (X e Y).

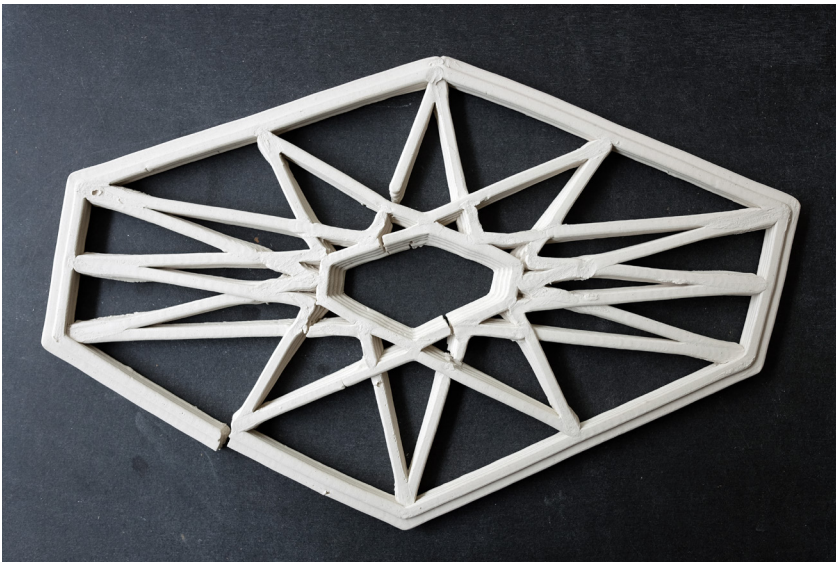
No arco de teste 1 depois da perda da água higroscópica presente na pasta (cura à temperatura ambiente) regista-se uma retração média de 7% na dimensão referencial X, de 10% em Y e de 15% em Z, estado este último valor diretamente relacionado com o processo de pós-produção a que os blocos são submetidos. Por sua vez o arco de teste 2, que apresenta uma geometria regular, os valores recolhidos após a cura das peças indicam reduções na ordem dos 6% e 9% em X e Y, respetivamente, e de 14% em Z, mais uma vez justificada pelos efeitos da pós-produção. Os valores da retração verificada na espessura de camada após a perda da água higroscópica ficam-se pelos 6% no arco de teste 1 e em 4% no arco de teste 2.

Nos registos feitos a seguir ao processo de cozedura das peças e tendo como referência os valores recolhidos depois da cura, verifica-se que, no arco de teste 1, a retração das dimensões X e Y cifra-se em 6% e 7%, respetivamente, e que em Z a média da retração é de 14% dos valores de referencia. Pelo registo dos valores relativos ao peso dos blocos percebe-se uma redução média de peso de 8%. No arco de teste 2, os valores apontam para reduções de 6% em X e Y, e de 14% em Z. O peso das peças sofreu uma redução 7% em cada uma

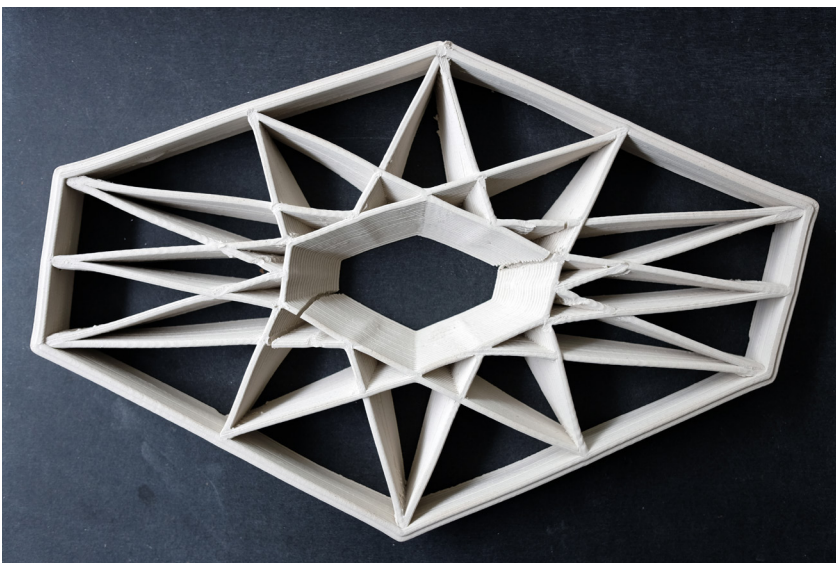




**Figura 6.21.** Teste de impressão 2 - Peça 19, ponta extrusora de 8mm. Após cozedura.



**Figura 6.22.** Teste de impressão 3 - Peça 19, ponta extrusora de 6mm. Após cozedura.



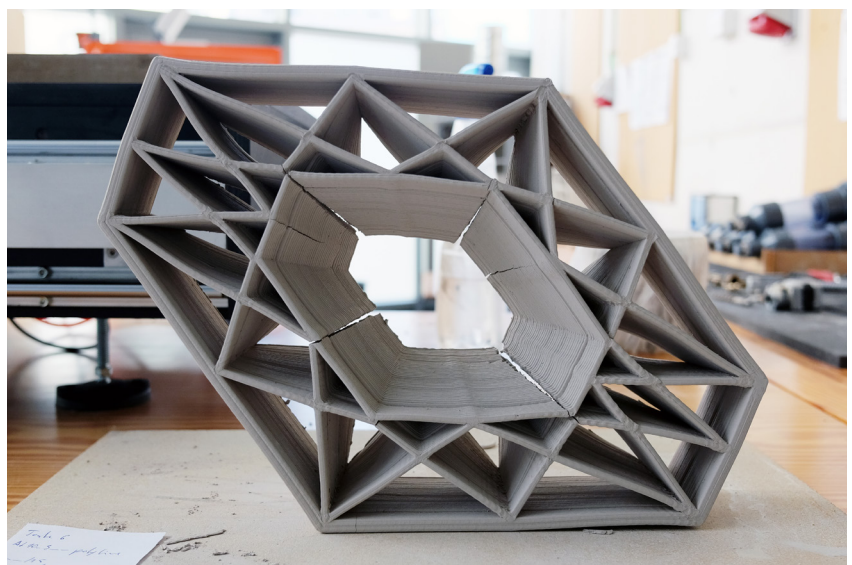
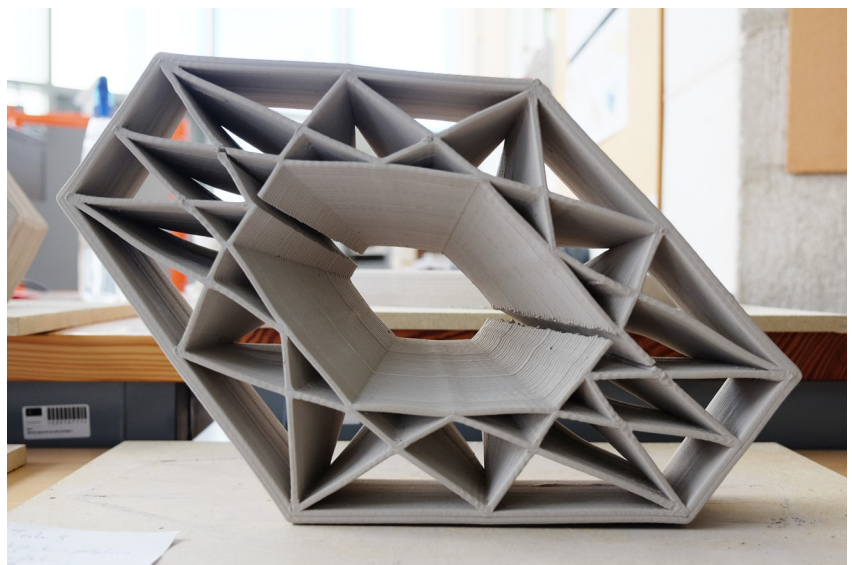
**Figura 6.23.** Teste de impressão 4 - Peça 19, ponta extrusora de 3mm. Após cozedura.



**Figura 6.24.** Deformação da geometria interior do bloco provocada pela retração do material.

**Figura 6.25.** Teste de impressão 5 - Rotura da superfície interior após cura à temperatura ambiente.

**Figura 6.26.** Teste de impressão 6 - Rotura da superfície interior após cura à temperatura ambiente.



delas. Aqui a retração média da espessura de camada em cada um dos arcos é de 12% para o arco de teste 1 e de 13% para o arco de teste 2.

Quando comparados os valores de referência do modelo digital com os resultados obtidos na medição das peças, finalizado o processo de produção, observam-se reduções consideráveis e que variam em função da geometria de cada peça. No arco de teste 1, em X a retração média foi de 12%, enquanto que em Y o valor é substancialmente superior, fixando-se em 16%. Em Z a retração média foi de 27% e a espessura das camadas teve uma redução de 18%. O arco de teste 2, registou reduções médias em X na ordem dos 12%, 15% em Y e 25% em Z. A espessura das camadas teve uma redução de 17%.

Para além do registo dimensional das peças foi feita também uma análise à fidelidade geométrica das mesmas em comparação com os modelos digitais. Uma das questões que teve particular importância neste olhar comparativo entre modelos digitais e impressos foi a agregação entre elementos, mais concretamente as ligações entre peças. Como foi referido anteriormente em 6.2.2. *Arcos de teste*, estas estruturas servem também para testar as ligações entre peças, sendo que para tal são introduzidas variações superficiais consideráveis com a intenção de travar toda a estrutura. Uma das condições para que estas ligações funcionassem do modo como foram concebidas é a correspondência formal entre faces justapostas.

Após a impressão, cura e cozedura de cada uma das peças, houve lugar à organização e correto posicionamento no conjunto do arco. Aí se percebeu que os efeitos da retração em conjugação com a metodologia aplicada no fabrico (deposição de material camada a camada), resultaram na não correspondência formal entre as faces coincidentes que servem de ligação entre blocos. Nestas ligações, quanto mais deformada é a superfície inicial (digital) menos o modelo impresso lhe é fiel.

Neste sentido, as ligações lisas, que apenas apresentam uma ligeira deformação na superfície, funcionam melhor e garantem uma razoável ligação entre elementos. Por oposição as ligações tipo macho/fêmea são problemáticas na medida em que não respeitam a geometria inicial e não garantem a integridade do conjunto, provocando grandes variações geométricas.

Para além das deformações registadas nas superfícies laterais das peças, também a estrutura interna dos blocos sofreu deformações, resultando em variações formais ao nível do contorno do bloco.

Para a montagem dos arcos de teste foi criada uma estrutura de apoio em acrílico, baseada na malha hexagonal que serve a geração da base dos blocos.

**Figura 6.27.** Excerto da tabela relativa à análise da retração dos blocos. Tabela completa disponível em anexo.

ARCO 1	A1_N1	A1_01	A1_02	A2_03	A1_04
<b>modelo digital</b>					
espessura da camada	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00
altura da camada	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50
afastamento entre linhas	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90
dimensão x	234,50	235,60	236,80	235,10	234,70
dimensão y	93,47	172,60	175,20	195,10	184,50
dimensão z	30,00	30,00	30,00	31,50	31,50
<b>cerâmica</b>					
tipo de cerâmica	Grês 130MP	Grês 130MP	Grês 130MP	Grês 130MP	Grês 130MP
água (%)	30 - 35	30 - 35	30 - 35	30 - 35	30 - 35
<b>modelo impresso</b>					
espessura da camada - após cura (mm)	2,66	2,79	2,58	2,93	2,84
espessura da camada - após ida ao forno (mm)	2,04	2,50	2,43	2,73	2,45
altura da camada perceptível - após cura (mm)	1,20	1,38	1,08	1,33	1,20
tempo de impressão (min.)	23	31	30	36	33
peso - após cura (g)	195,10	310,90	321,60	344,60	299,10
peso - após ida ao forno (g)	179,90	287,10	296,20	319,10	276,00
dimensão x - após cura (mm)	218,00	222,00	222,00	218,50	218,50
dimensão y - após cura (mm)	79,00	154,00	157,50	178,50	168,00
dimensão z - após cura (mm)	25,88	24,91	24,71	28,05	26,11
dimensão x - após ida ao forno (mm)	203,5	209	208	205,5	205
dimensão y - após ida ao forno (mm)	74,5	143	142	167,8	152,2
dimensão z - após ida ao forno (mm)	22,69	21,55	21,31	23,96	22,21
<b>comparação digital vs cura</b>					
espessura da camada	-11%	-7%	-14%	-2%	-5%
dimensão x	-7%	-6%	-6%	-7%	-7%
dimensão y	-15%	-11%	-10%	-9%	-9%
dimensão z	-14%	-17%	-18%	-11%	-17%
<b>comparação cura vs forno</b>					
espessura da camada	-23%	-10%	-6%	-7%	-14%
dimensão x	-7%	-6%	-6%	-6%	-6%
dimensão y	-6%	-7%	-10%	-6%	-9%
dimensão z	-12%	-13%	-14%	-15%	-15%
peso	-8%	-8%	-8%	-7%	-8%
<b>comparação digital vs físico</b>					
espessura da camada	-32%	-17%	-19%	-9%	-18%
dimensão x	-13%	-11%	-12%	-13%	-13%
dimensão y	-20%	-17%	-19%	-14%	-18%
dimensão z	-24%	-28%	-29%	-24%	-29%

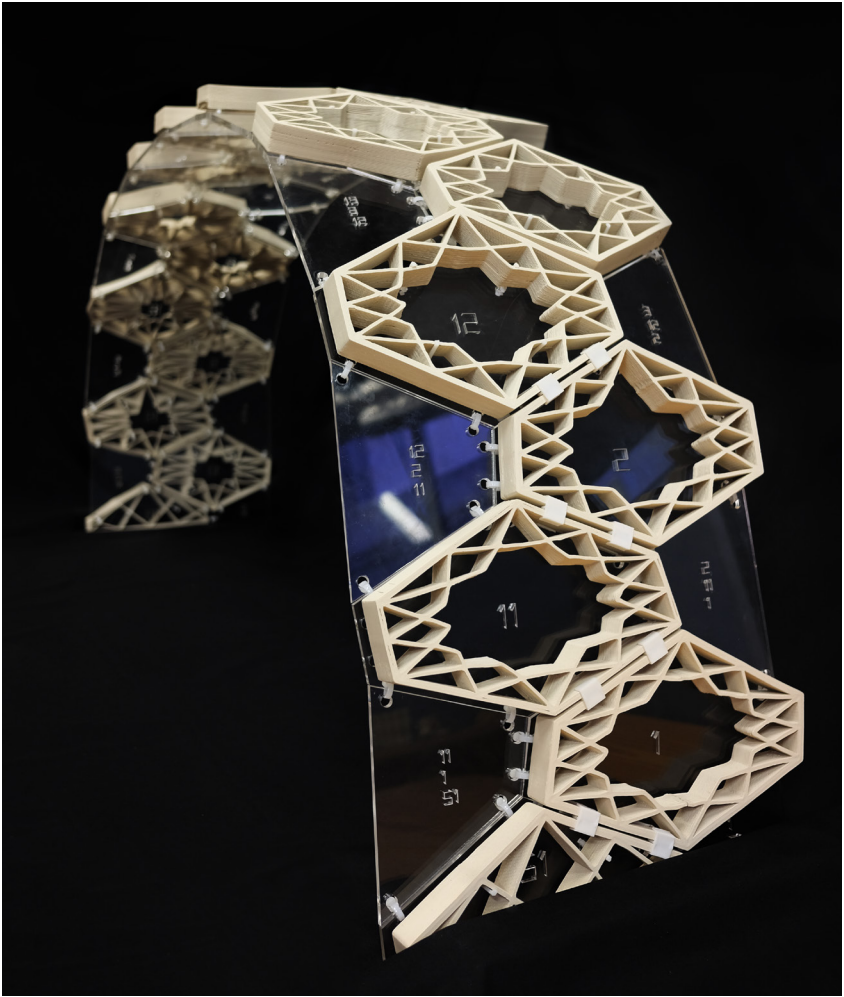
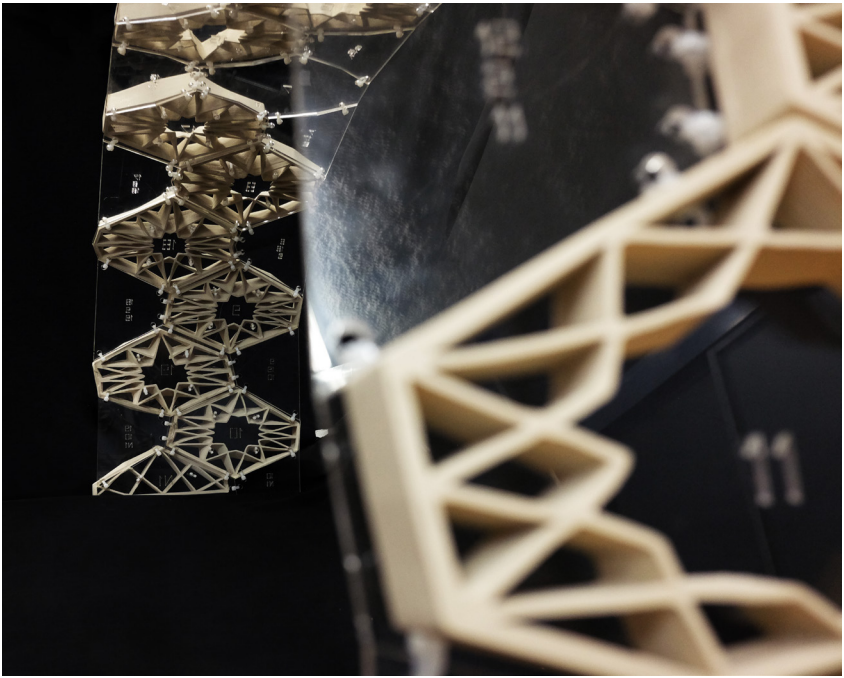


Figura 6.28. Arco de teste 1.

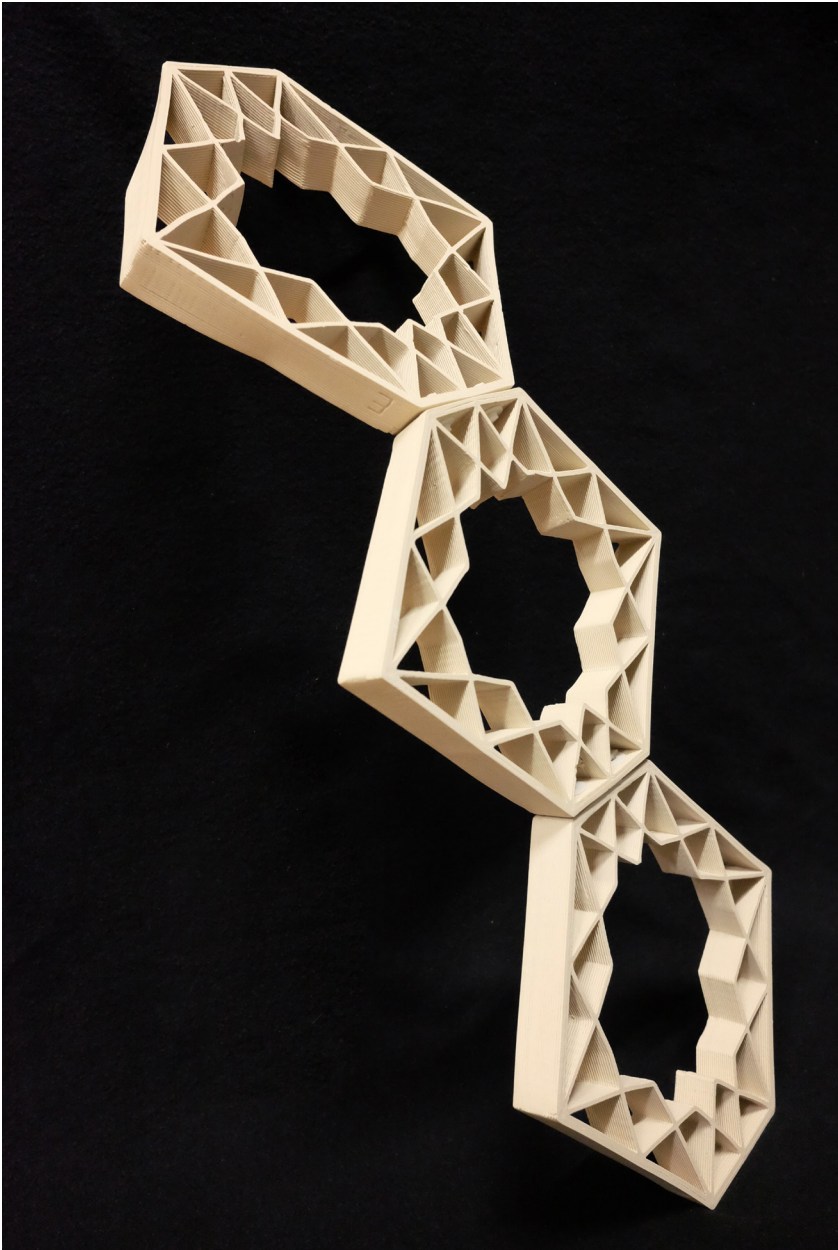
Figura 6.29. Arco de teste 1.





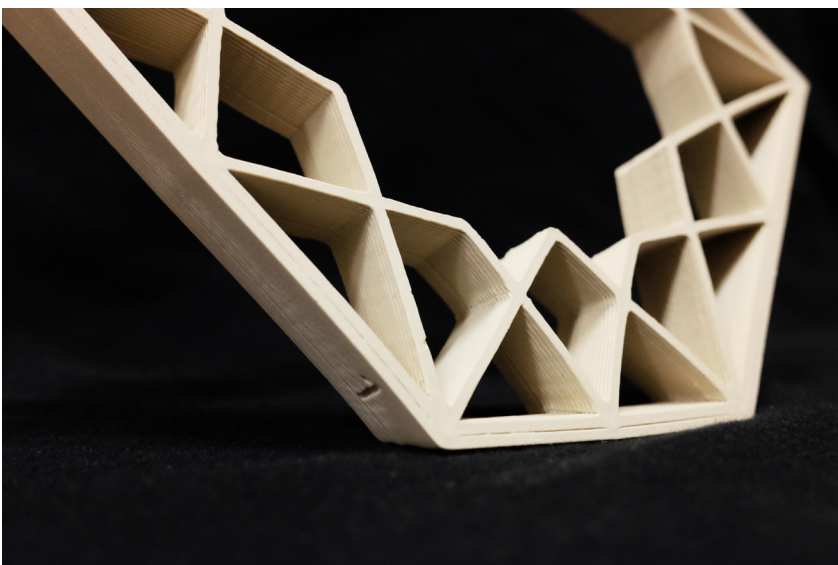
**Figura 6.30.** Arco de teste 1 - pormenor da zona menos permeável.





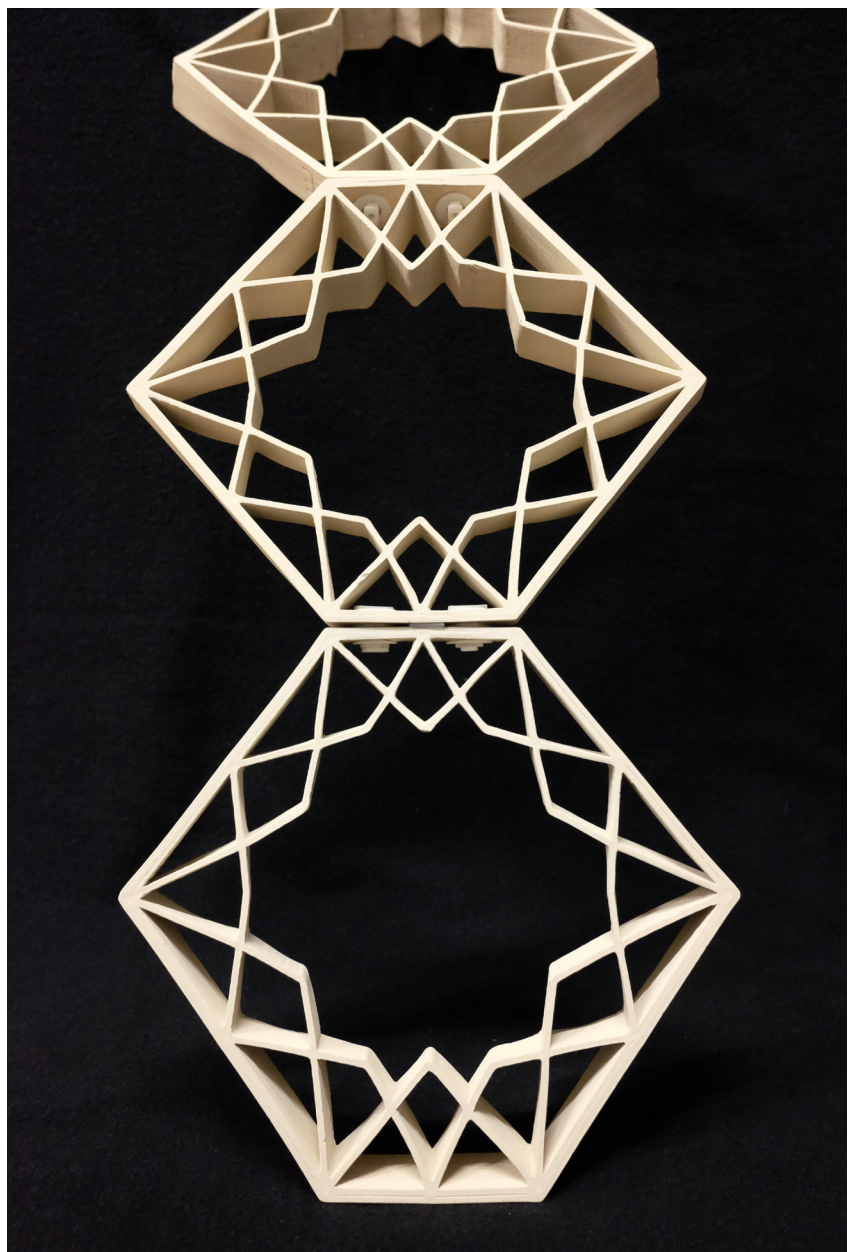
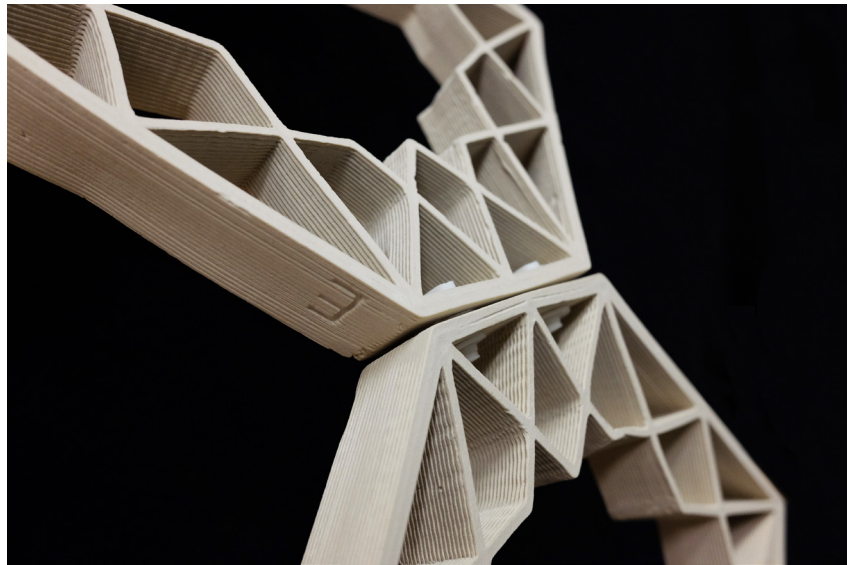
**Figura 6.31.** Arco de teste 2.

**Figura 6.32.** Arco de teste 2 - pormenor da base.



**Figura 6.33.** Arco de teste 2 - pormenor de uma ligação mecânica.

**Figura 6.34.** Arco de teste 2 - arranque do arco.







# 7. Conclusão

O presente capítulo serve de síntese dos resultados mais relevantes desta investigação e mostra as suas principais contribuições para a integração de ferramentas de desenho e fabrico digital na prática arquitetónica.

A investigação e os casos de estudo desenvolvidos no seu contexto demonstraram que estes métodos abrem novas possibilidades para o desenvolvimento de soluções arquitetónicas e construtivas. Do total do corpo da investigação que aqui se conclui, destacam-se as seguintes considerações:

(1) Na contemporaneidade, verifica-se que uma parte significativa das mudanças e inovações tecnológicas e formais registadas na prática da arquitetura decorrem da adoção de técnicas de desenho e produção baseadas em processos CAD/CAM já explorados por outras indústrias, nomeadamente a automóvel, a naval e a aeronáutica. Seguindo estes exemplos, a arquitetura, tem vindo a efetivar a utilização destas ferramentas na fase conceção do projeto, trazendo novas possibilidades, facilitando o aparecimento de novas geometrias.

(2) A integração de lógicas de desenho paramétrico na arquitetura representa uma mudança de paradigma relativamente aos processos de definição de projeto que não formalizam algoritmicamente as premissas de projeto, com capacidade de auxiliar a definição das soluções. A utilização destas ferramentas de desenho conduz à criação de sistemas que visam responder um ou mais problemas, podendo estes sistemas formular várias soluções e auxiliar à seleção da que dê melhores respostas, em função de premissas pré-definidas.

(3) A aplicação de tecnologias digitais à arquitetura constitui uma reconfiguração na relação entre as fases de desenho e produção, tornando possível a correspondência entre o que se pode desenhar e o que se pode construir.

(4) No contexto do fabrico aditivo a materialização de geometrias complexas leva o mesmo tempo, esforço e recursos que a produção de geometrias mais simples, contrariamente ao que acontece com os processos de fabrico tradicionais.

(5) As propriedades físicas dos materiais cerâmicos permitem uma grande variedade de aplicações na arquitetura. Dureza, densidade e durabilidade levaram à aplicação de cerâmica em edifícios de todo o mundo durante séculos. Esta ideia pode também ser transferida e reforçada para a produção aditiva em cerâmica.

(6) No processo de fabrico aditivo de pasta cerâmica numa impressora 3D, para que a extrusão se faça de forma satisfatória é necessária a coordenação de três parâmetros: a pressão de ar aplicada no cartucho, a velocidade de rotação do fuso e a viscosidade da pasta. Todos estes fatores influenciam o resultado da impressão na medida em que condicionam a forma como a extrusão é feita.

(7) A quantidade de água presente na pasta é uma das variáveis mais importantes para a concordância ou não concordância formal entre o modelo impresso e o modelo digital no qual se baseia.

(8) Da análise dos resultados dos testes de impressão dos modelos iniciais verificou-se que se tivermos apenas em conta a fidelidade geométrica do modelo físico ao modelo digital, obtemos melhores resultados quando é utilizada a ponta extrusora de 3mm. Pontas de maior diâmetro garantem, à partida, uma maior rigidez estrutural, tanto da peça, como do conjunto da agregação.

(9) Pela observação dos modelos iniciais após a cura e decorrente cozedura, a maior concentração de material que existe nos casos em que são utilizadas as pontas de 6 e 8mm, traduz-se em tensões substancialmente superiores, resultando na quebra pontual e aleatória da peça.

(10) Da comparação entre modelos digitais e físicos constata-se que a retração que ocorre nas duas fases decorrentes da impressão resulta em variações formais significativas. Os valores revelam que a retração está diretamente relacionada com a geometria da peça, das dimensões e da quantidade de material em cada direção. Na generalidade dos modelos produzidos a retração situa-se entre os 12% e os 17% do total inicial.

(11) Quanto maior for a inclinação (relativamente a Z) das geometrias a imprimir maior será a deformação ocorrida nas fases de cura e cozedura, resultado em maiores discrepâncias entre modelos digitais e físicos, sendo que os testes realizados revelam que deformações significativas ocorrem com inclinações superficiais superiores a 30%.

(12) Ligações tipo macho/fêmea, pela sua complexidade formal, resultam em grandes variações formais da superfície, dificultando o funcionamento do conjunto.

(13) Para a execução de impressões que respeitem geometricamente o modelo digital, é necessária a execução de testes em número suficiente para aferir os valores da retração média que é necessário contrariar em função da geometria e dimensão de cada uma das peças.

No decorrer dos trabalhos desta investigação foram ainda levantadas outras questões, que à partida não estavam ponderadas, mas que se mostraram bastante importantes e que teriam um contributo significativo no desenvolvimento da temática em estudo. Destas, e para um melhor controlo de efeitos de retração e para evitar a ocorrência de roturas superficiais destacam-se: (a) testes de integração de agentes químicos na pasta cerâmica, com o intuito de garantir uma boa plasticidade da pasta cerâmica com percentagens de água inferiores; (b) a mistura de microfibras na pasta de modo a aumentar a resistência das suas superfícies. Para além destas últimas a vitrificação das peças cerâmicas seria também uma das questões a abordar, uma vez que se poderia traduzir num melhor acabamento e resposta funcional das peças.



## 8. Bibliografia

- Andreani, S., Garcia del Castillo, J. L., Jyoti, A., King, N., & Bechthold, M. (2012). Flowing Matter: Robotic fabrication of complex ceramic systems. *Gerontechnology*, 11(2). <https://doi.org/10.4017/gt.2012.11.02.582.770>
- Andreson, J., & Tang, M. (2011). Form Follows Parameters. In C. M. Herr, N. Gu, S. Roudavski, & M. A. Schnabel (Eds.), *Circuit bending, Breaking and Mending: Proceedings of the 16th International Conference on Computer-Aided Architectural Design Research in Asia* (pp. 91–100). Hong Kong: CAADRIA. Retrieved from [http://cumincad.scix.net/data/works/att/caadria2011\\_009.content.pdf](http://cumincad.scix.net/data/works/att/caadria2011_009.content.pdf)
- Andrade, F.A., Al-Qureshi, H.A. and Hotza, D., Measuring the plasticity of clays: A review. *Applied Clay Science*, 2011; 51, 1-7.
- Aksamija, A. (2016). *Integrating Innovation In Architecture: Design, Methods and Technology for Progressive Practice and Research*. John Wiley and Sons LTD.
- Araujo, L., Andres, R., Zupancic, T., Juvancic, M., Verovsek, S., & Jutraz, A. (2011). BIM. BON . A BIM system for architectural practice in Brazil. *Ecaade 2011: Respecting Fragile Places*, 439–443.
- Araya, S., Zolotovskiy, E., Veliz, F., Song, J., Reichert, S., Boyce, M., & Ortiz, C. (2013). Bioinformed Performative Composite Structures. *Computation and Performance - Proceedings of the 31st eCAADe*, 1, 575–584.
- Arsenovic, M., Lalic, Z., & Radojevic, Z. (2010). Clay brick walls thermal properties. *International Journal of Modern Manufacturing Technologies*, 11(1), 15–18.
- Agustí-Juan, I., & Habert, G. (2016). An Environmental Perspective on Seattle. In S. Chien, S. Choo, M. A. Schnabel, W. Nakapan, M. J. Kim, & S. Roudavski (Eds.), *Living Systems and Micro-Utopias: Towards Continuous Designing*, Proceedings of the 21st International Conference of the Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia CAADRIA 2016 (pp. 797–806). Hong Kong: CAADRIA.
- Ayers, P., Tamke, M., & Thomsen, M. (2013). *Digital Material*. Riverside Architectural Press.
- Banham, R. (1969). *The Architecture of the well-tempered environment*. Chicago: The Architectural Press, London.
- Barbosa, I., & Figueiredo, B. (2017). *Optimized Brick – Print Optimization*.
- Bechthold, M., King, J., Kane, A., Niemasz, J., & Reinhart, C. F. (2011). Integrated Environmental Design and Robotic Fabrication Workflow for Ceramic Shading Systems. In 2011 Proceedings of the 28th Conference of the International Association for Automation and Robotics in Construction (pp. 70–75). I.A.A.R.C. - International Association for Automation and Robotics in Construction Civil Engineering. Retrieved from <http://nrs.harvard.edu/urn-3:HUL.InstRepos:12308165>

- Bechthold, M., Kane, A., & King, N. (2015). *Ceramic Material Systems in Architecture and Interior Design*. Basel: BIRKHÄUSER BASEL.
- Bell, B., Barnes, N., Ede, A., & Read, T. C. (2014). Casting Non-Repetitive Geometries With Digitally. In *ACADIA 2014 Design Agency: Proceedings of the 34th Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture* (pp. 453–462).
- Benrós, D., Eloy, S., & Duarte, J. P. (2015). Re-inventing Ceramic Tiles: Using shape grammars as a generative method and the impact on design methodology. In *16th International Conference CAAD Futures 2015* (pp. 467–480). Retrieved from [http://papers.cumincad.org/cgi-bin/works/Show?cf2015\\_467](http://papers.cumincad.org/cgi-bin/works/Show?cf2015_467)
- Berman, B. (2012). 3D printing: The new industrial revolution. *Business Horizons*, 55(2), 155–162. <https://doi.org/10.1016/j.bushor.2011.11.003>
- Birtchnell, T., & Urry, J. (2013). 3D, SF and the future. *Futures*, 50, 25–34. <https://doi.org/10.1016/j.futures.2013.03.005>
- Boeykens, S., Neuckermans, H., & Leuven, K. U. (2006). Improving Design Workflow in Architectural Design Applications. *International Journal of Architectural Computing*, 4(4), 1–19. <https://doi.org/10.1260/147807706779399033>
- Bren, H. N. (2016). *A Tipping Point: technology in ceramics*. (E. Coleman, Ed.). Minneapolis: Northern Caly Center. Retrieved from [http://www.architectmagazine.com/technology/a-tipping-point-for-art-and-design-in-the-digital-age\\_o](http://www.architectmagazine.com/technology/a-tipping-point-for-art-and-design-in-the-digital-age_o)
- Caldas, L., & Duarte, J. P. (2005). Fabricating Ceramic Covers: Rethinking Roof Tiles in a Contemporary Context. In *eCAADe 23* (pp. 269–276). Retrieved from [http://cumincad.scix.net/cgi-bin/works/Show?\\_id=2005\\_269](http://cumincad.scix.net/cgi-bin/works/Show?_id=2005_269)
- Carpo, M. (2001). *Architecture in the age of printing*. MIT Press.
- Carpo, M. (2011). *The Alphabet and the Algorithm*. Massachusetts: MIT Press.
- Çavuşoğlu, Ö. H. (2015). The Position of BIM Tools in Conceptual Design Phase : Parametric Design and Energy Modeling Capabilities. *eCAADe 33*, 1, 607–612.
- Celento, D., & Harrow, D. (2008). *ceramiSKIN: Digital Possibilities for Ceramic Cladding Systems*. In *ACADIA 2008 Biological Processes and Computation* (pp. 262–299).
- Celento, D., & Harrow, D. (2008). *CeramiSKIN: Aperiodic Tiling using Biphilic Data in Cladding Systems*. In *eCAADe 26* (pp. 709–716).
- Colletti, M. (2010). *Exuberance: New Virtuosity in Contemporary Architecture*. John Wiley and Sons LTD.
- Corser, R. (2010). *Fabricating Architecture: Selected Readings In Digital Design and Manufacturing*. Princeton Architectural Press.

- Cruz, P. J. S., Knaack, U., Figueiredo, B., & Witte, D. De. (2017). Ceramic 3D printing – The future of brick architecture.
- Davis, D. (2013). Modelled on Software Engineering : Flexible Parametric Models in the Practice of Architecture. Ph.D Thesis, (February), 243. Retrieved from [http://www.danieldavis.com/papers/danieldavis\\_thesis.pdf](http://www.danieldavis.com/papers/danieldavis_thesis.pdf)
- Daoud, B., & Voordouw, J. (2015). Making Machines that Make Buildings Constructing a Mobile 3D Printer for Concrete Elements. In eCAADe 2015: Real Time - Extending the Reach of Computation, Vol 2 (Vol. 2, pp. 355–359).
- Derby, B. (2015). Additive Manufacture of Ceramics Components by Inkjet Printing. *Engineering*, 1(1), 113–123. <https://doi.org/10.15302/J-ENG-2015014>
- Direcção-Geral JRC Centro De Investigação Conjunta; Instituto de Estudos de Tecnologia Prospectiva. (2006). Documento de referência sobre as Melhores Técnicas Disponíveis na Indústria Cerâmica, 45–84.
- Dritsas, S., & Yeo, K. S. (2013). Undrawable architecture. In *Open Systems - Proceedings of the 18th International Conference on Computer-Aided Architectural Design Research in Asia, CAADRIA 2013* (pp. 833–842). Retrieved from <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84894117008&partnerID=tZ0tx3y1>
- Dunn, N. (2012). *Digital Fabrication In Architecture*. London: Laurence King Publishing Limited.
- Fadhel, N. F., Crowder, R. M., & Wills, G. B. (2015). Provenance in the additive manufacturing process. *IFAC-PapersOnLine*, 28(3), 2345–2350. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.06.438>
- Figueiredo, B. (2008). *Projecto, computação e fabrico*. Universidade Técnica de Lisboa.
- Figueiredo, B. (2013). Computação e síntese de projeto: modelos computacionias como instrumentos metodológicos no ensino de projecto. *Joelho* 04, 90–93.
- Fischer, T., & Herr, C. M. (2016). Parametric Customisation of a 3D Concrete Printed Pavilion. In S. Chien, S. Choo, M. A. Schnabel, W. Nakapan, M. J. Kim, & S. Roudavski (Eds.), *Living Systems and Micro-Utopias: Towards Continuous Designing, Proceedings of the 21st International Conference of the Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia CAADRIA 2016* (pp. 549–558). Hong Kong: CAADRIA.
- Foged, H. I. W. (2016). *Bricks / Systems*. Aalborg: Aalborg University. <https://doi.org/10.5278/vbn.phd.engsci.00010>
- Garcia, M. J., & Retsin, G. (2012). Design Methods for Large Scale Printing. *Real Time*. In eCAADe 33 (Vol. 2, pp. 331–339).
- Grobman, Y. J., & Neuman, E. (2006). *Performatism: Form And Performance In Digital Architecture*. Taylor & Francis LTD.



- Guessasma, S., Zhang, W., Zhu, J., Belhabib, S., & Nouri, H. (2015). Challenges of additive manufacturing technologies from an optimisation perspective. *International Journal for Simulation and Multidisciplinary Design Optimization*, 6(A9), 1–13. <https://doi.org/10.1051/smdo/2016001>
- Hack, N., & Lauer, W. V. (2014). Robotically Fabricated Spatial Meshes as Reinforced concrete Formwork.
- Herpt, O. (2016). Functional 3D Printed Ceramics. Retrieved from <http://oliviervanherpt.com/functional-3d-printed-ceramics/>
- Hensel, M. U. (2013). Performance-oriented design as a framework for renovating architectural practice and innovating research by design. *Design Innovation for the Built Environment: Research by Design and the Renovation of Practice*, 9780203129746(September 2012), 121–144. <https://doi.org/10.4324/9780203129746>
- Hoskins, S. (2013). Johnatan Keep (case study). In *3D Printing for Artists, Designers and Makers* (p. 144). Bloomsbury Visual Arts. Retrieved from <http://www.bloomsbury.com/uk/3d-printing-for-artists-designers-and-makers-9781408173794/#sthash.uDWbavFQ.dpuf>
- Huson, D. (2013). 3D printing of self-glazing ceramic materials: An investigation inspired by ancient Egyptian technology. In *International Conference on Digital Printing Technologies 29* (pp. 14–17). Seattle: Society for Imaging Science and Technology. Retrieved from <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84897678623&partnerID=tZOtx3y1>
- Imbern, M., Raspall, F., & Su, Q. (2012). Tectonic Tessellations: A digital approach to ceramic structural surfaces. In C. C. of the Arts (Ed.), *Synthetic Digital Ecologies: Proceedings of the 32nd Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture* (pp. 315–321). San Francisco: ACADIA.
- Iwamoto, L. (2009). *Digital Fabrications: Architectural And Material Techniques*. Princeton Architectural Press.
- Jackson, M. (2003). *Diagram of the Fold The actuality of virtual architecture*. Auckland University of Technology.
- Jančič, L. (2016). *Implications of the use of Additive Manufacturing in architectural design*. FA Ljubljana.
- Knaack, U., Schneider, J., Cruz, P. J. S., & Colombo, P. (2017). *Additive Manufacturing for the Built Environment*, 1–8.
- Kolarevic, B. (2005). *Architecture In The Digital Age: Design And Manufacturing*. Taylor & Francis LTD.
- Kolarevic, B. (2005). *Performative Architecture: Beyond Instrumentality* (1st ed.). Taylor & Francis LTD.
- Kolarevic, B. (2000). Digital Architectures. In M. J. Clayton & G. P. V. de Velasco (Eds.), *ACADIA 2000: Eternity, Infinity and Virtuality in architecture*. ACADIA.

- Kothapuram, S., Jiawei, S., Mei-Ling, L., & Han, L. (2012). Digital Vernacular. In *Synthetic Digital Ecologies: Proceedings of the 32nd Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture* (pp. 187–196). ACADIA.
- Kwon, H. (2002). *Experimentation and Analysis of Contour Crafting (CC) Process Using Uncured Ceramic Materials*. University Of Southern California.
- Leach, N. (2009). *Digital Cities: Architectural Design*. John Wiley and Sons LTD.
- Lilley, B., Macdonald, R., Cheng, N. Y., Nielsen, S. A., & Sheng-fu, C. (2012). Ceramic Perspiration: Multi-Scalar Development of Ceramic Material. In *ACADIA 2012 Synthetic Digital Ecologies* (pp. 97–109).
- Lim, S., Buswell, R. A., Le, T. T., Austin, S. A., Gibb, A. G. F., & Thorpe, T. (2012). Developments in construction-scale additive manufacturing processes. *Automation in Construction*, 21(1), 262–268. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2011.06.010>
- Loukissas, Y., & Sass, L. (2004). Rulebuilding: a generative approach to modeling architecture using 3D printers. In P. Beesley, N. Cheng, & R. S. Williamson (Eds.), *Fabrication: Examining the Digital Practice of Architecture: Proceedings of the 23rd Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture and the 2004 Conference of the AIA Technology in Architectural Practice Knowledge Community* (pp. 176–185). Toronto: ACADIA.
- Lourenço, P. B., & Vasconcelos, G. (2014). The design and mechanical performance of high-performance perforated fired masonry bricks. In *Eco-efficient Masonry Bricks and Blocks: Design, Properties and Durability* (pp. 13–44). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-305-8.00002-4>
- Menges, A., Sheil, B. O. B., Glynn, R., & Skavara, M. (Eds.). (2017). *Fabricate 2017: Rethinking Design and Construction*. London: UCL Pressz.
- Mitchell, W. J. (1995). *City of Bites (First)*. MIT Press.
- Olmo, P. Del, & Noemi, M. (2011). Additive manufacturing of non plastic porcelain material by direct writing and freeze casting. De Montfort University. Retrieved from <http://hdl.handle.net/2086/5620>
- Oti, J. E., Kinuthia, J. M., & Bai, J. (2009). Engineering properties of unfired clay masonry bricks. *Engineering Geology*, 107(3–4), 130–139. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2009.05.002>
- Oxman, R., & Oxman, R. (2013). *Theories Of The Digital In Architecture*. Taylor & Francis LTD.
- Oxman, N., Oxman, N., Mitchell, W. J., Arts, M., Supervisor, T., & Beinart, J. (2010). *Material-based Design Computation*.

- Peters, B. (2014). Additive Formwork 3D Printed Flexible Formwork. In D. Gerber, A. Huang, & J. Sanchez (Eds.), *ACADIA 2014 Design Agency: Proceedings of the 34th Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture* (pp. 517–522). Los Angeles: Riverside Architectural Press; ACADIA.
- Peters, B. (2013). Building Bytes : 3D-PRINTED BRICKS. In P. Beesley, O. Khan, & M. Stacey (Eds.), *Proceedings of the 33rd Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture* (pp. 433–434). Cambridge, Ontario: ACADIA.
- Peters, B. (2012). Building Bytes: 3D-printed ceramic bricks developed for large-scale construction. Retrieved from <http://www.3ders.org/article/20121101-3d-printed-ceramic-bricks-developed-for-large-scale-construction.html>
- Pinto, Y. A., & Regiane, P. (2015). Explorando a ferramenta de programação em design: um estudo sobre grasshopper. In *SIGRADI 2015: project information for interaction* (pp. 686–690). Retrieved from <http://sigradi2015.sites.ufsc.br/%5Chttp://www.proceedings.blucher.com.br/article-list/sigradi-2015-259/list#articles>
- Phirak Suon. (2016). Dynamic Ceramic, 79. Retrieved from <http://www.dynacer.com/materials/alumina/>
- Poole, M., & Shvartzberg, M. (2015). *The Politics Of Parametricism: Digital Technologies In Architecture*. Bloomsbury Publishing PLC.
- Prince, J. D. (2014). 3D Printing: An Industrial Revolution. *Journal of Electronic Resources in Medical Libraries*, 11(January 2015), 39–45. <https://doi.org/10.1080/15424065.2014.877247>
- Sheil, B. (2008). *Proto Architecture: Analogue And Digital Hybrids*. John Wiley and Sons LTD.
- Snyder, T. J., Andrews, M., Weislogel, M., Moeck, P., Stone-Sundberg, J., Birkes, D., ... Graft, J. (2014). 3D Systems' Technology Overview and New Applications in Manufacturing, Engineering, Science, and Education. *3d Printing and Additive Manufacturing*, 1(3), 169–176. <https://doi.org/10.1089/3dp.2014.1502>
- Sperling, D. M., & Herrera, P. C. (Eds.). (2015). *Homo Faber Digital Fabrication In Latin America CAAD futures 2015 > the next city*. São Paulo: Instituto de Arquitetura e Urbanismo. Retrieved from [http://www.fec.unicamp.br/~celani/caadfutures\\_2015/%0Ahomofaber\\_catalogue.pdf](http://www.fec.unicamp.br/~celani/caadfutures_2015/%0Ahomofaber_catalogue.pdf)
- Spiegelhalter, T., & Andia, A. (2014). *Post-Parametric: Automation In Design And Construction*. Artech House.
- Stevens, J. (2015). *Digital Vernacular: Architecture Principles, Tools And Processes*. Taylor & Francis LTD.

- Suzuki E., S. (2016). Extruded architectures. In S. Chien, S. Choo, M. A. Schnabel, W. Nakapan, M. J. Kim, & S. Roudavski (Eds.), *Living Systems and Micro-Utopias: Towards Continuous Designing*, Proceedings of the 21st International Conference of the Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia CAADRIA 2016 (pp. 745–754). Hong Kong: CAADRIA.
- Talbott, K. (2006). 3D Print as Corporeal Design Medium. *International Journal of Architectural Computing*, 4(4), 137–152. <https://doi.org/10.1260/147807706779398980>
- Tan, R., & Dritsas, S. (2016). Clay robotics. In S. Chien, S. Choo, M. A. Schnabel, W. Nakapan, M. J. Kim, & S. Roudavski (Eds.), *Living Systems and Micro-Utopias: Towards Continuous Designing*, Proceedings of the 21st International Conference of the Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia CAADRIA 2016 (pp. 579–588). Hong Kong: CAADRIA.
- Terzidis, K. (2009). *Algorithms for visual design using the processing language*. Wiley Publishing, Inc. Retrieved from <http://goo.gl/Plnehi>
- Utela, B., Storti, D., Anderson, R., & Ganter, M. (2008). A review of process development steps for new material systems in three dimensional printing (3DP). *Journal of Manufacturing Processes*, 10(2), 96–104. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2009.03.002>
- Verbruggen, D. (2014). *Reprap Magazine*. *Reprap Magazine: Practical exploration of 3D printing*. reprapmagazine. Retrieved from [www.reprapmagazine.com](http://www.reprapmagazine.com)
- Wu, P., Wang, J., & Wang, X. (2016). A critical review of the use of 3-D printing in the construction industry. *Automation in Construction*, 68, 21–31. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.04.005>
- van der ZEE, A., de VRIES, B., & SALET, T. (2014). From rapid prototyping to automated manufacturing. In *Fusion: Data Integration at Its Best*, Vol 1 (Vol. 1, pp. 455–461).





## 9. Anexos

**Anexo 1.** Tabela Arco de teste 1



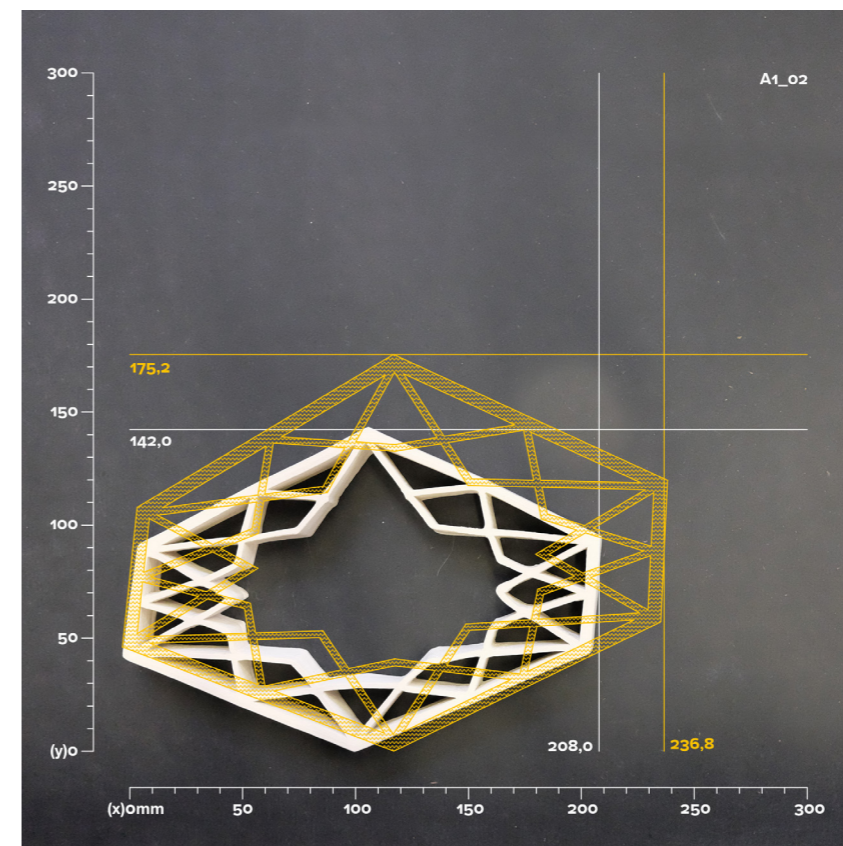
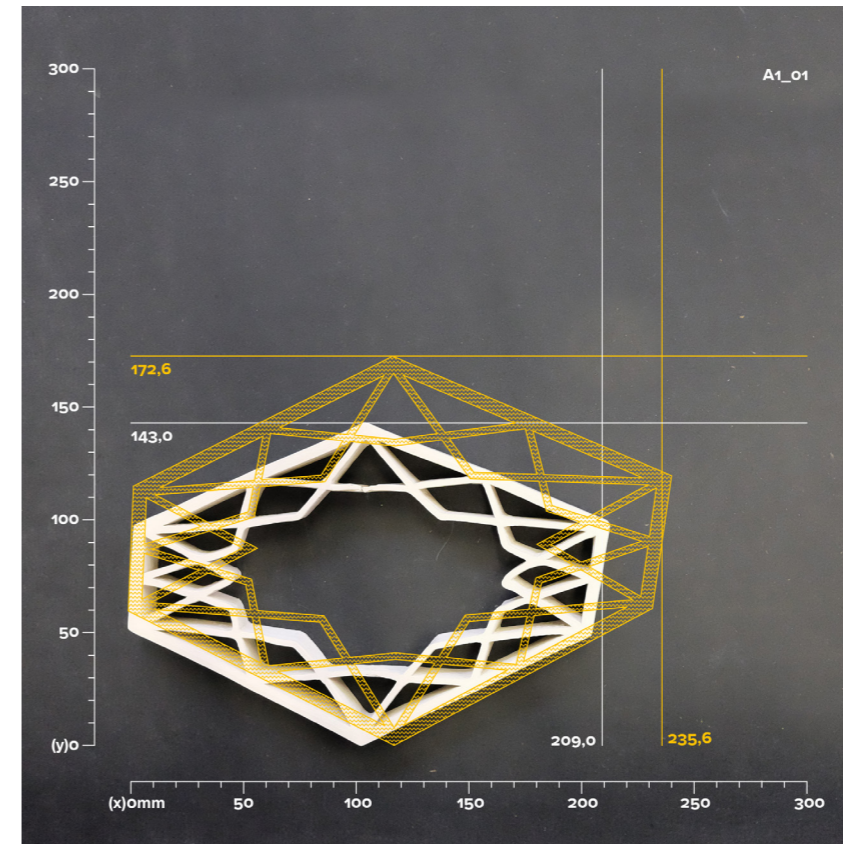
ARCO 1	A1_N1	A1_01	A1_02	A2_03	A1_04	A1_05	A1_06	A1_07	A1_08	A1_09	A1_10	A1_11	A1_12	A1_13	A1_14	A1_15	A1_16	A1_17	A1_18	A1_19	A1_S1
<b>modelo digital</b>																					
espessura da camada	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00
altura da camada	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50
afastamento entre linhas	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90
dimensão x	234,50	235,80	236,80	235,10	234,70	234,10	234,10	234,80	235,40	236,90	236,10	237,00	235,90	235,10	234,50	234,10	234,60	235,10	234,90	238,20	234,60
dimensão y	93,47	172,60	175,20	195,10	184,50	173,30	173,70	184,40	194,50	175,30	171,70	162,70	191,60	190,10	179,30	168,60	179,20	189,70	191,40	162,70	93,90
dimensão z	30,00	30,00	30,00	31,50	31,50	31,50	31,50	31,50	30,00	33,00	31,50	30,00	30,00	31,50	30,00	30,00	31,50	31,50	33,00	33,00	30,00
<b>cerâmica</b>																					
tipo de cerâmica	Grês 130MP	Grês 130MP	Grês 130MP	Grês 130MP	Grês 130MP	Grês 130MP	Grês 130MP	Grês 130MP	Grês 130MP	Grês 130MP	Grês 130MP	Grês 130MP	Grês 130MP	Grês 130MP	Grês 130MP	Grês 130MP	Grês 130MP	Grês 130MP	Grês 130MP	Grês 130MP	Grês 130MP
água (%)	30 - 35	30 - 35	30 - 35	30 - 35	30 - 35	30 - 35	30 - 35	30 - 35	30 - 35	30 - 35	30 - 35	30 - 35	30 - 35	30 - 35	30 - 35	30 - 35	30 - 35	30 - 35	30 - 35	30 - 35	30 - 35
<b>modelo impresso</b>																					
espessura da camada - após cura (mm)	2,66	2,79	2,58	2,93	2,84	2,61	2,91	2,89	3,09	3,21	2,91	2,50	2,57	2,68	2,43	2,93	2,99	3,20	2,67	2,95	2,84
espessura da camada - após ida ao forno (mm)	2,04	2,50	2,43	2,73	2,45	2,33	2,30	2,46	2,75	2,88	2,52	2,14	2,44	2,41	2,08	2,49	2,68	2,81	2,27	2,57	2,65
altura da camada perceptível - após cura (mm)	1,20	1,38	1,08	1,33	1,20	1,31	1,20	1,15	1,26	1,22	1,20	1,58	1,30	1,38	1,40	1,37	1,28	1,18	1,28	1,15	1,15
tempo de impressão (min.)	23	31	30	36	33	34	33	37	34	38	34	30	32	33	31	33	35	36	40	38	19
peso - após cura (g)	195,10	310,90	321,60	344,60	299,10	293,60	315,40	373,20	362,50	426,80	332,70	289,40	314,20	304,80	247,50	314,20	318,80	395,60	406,60	368,15	199,70
peso - após ida ao forno (g)	179,90	287,10	296,20	319,10	276,00	270,70	291,10	344,40	334,30	393,90	306,90	267,10	290,70	281,00	228,20	289,80	295,20	365,00	375,20	340,10	183,80
dimensão x - após cura (mm)	218,00	222,00	222,00	218,50	218,50	218,00	217,00	218,00	220,00	221,00	218,00	221,50	220,50	218,00	216,00	218,00	219,50	219,00	216,00	221,00	218,00
dimensão y - após cura (mm)	79,00	154,00	157,50	178,50	168,00	150,00	156,00	171,50	177,00	160,50	155,00	145,00	172,50	177,00	158,00	153,50	161,00	173,00	176,00	146,50	83,00
dimensão z - após cura (mm)	25,88	24,91	24,71	28,05	26,11	27,63	26,05	27,80	25,00	28,10	27,72	24,54	24,37	26,06	25,40	25,14	26,08	27,94	29,09	27,55	24,89
dimensão x - após ida ao forno (mm)	203,5	209	208	205,5	205	206	205,5	204,5	207	207,6	204,4	208	205,8	204,3	202,5	205,2	206,9	206	208,5	208,5	203,5
dimensão y - após ida ao forno (mm)	74,5	143	142	167,8	152,2	138,2	145,3	160,5	165,2	149,5	145	136,5	161,2	162,1	147	143,3	151	162	163,5	136,4	77,5
dimensão z - após ida ao forno (mm)	22,69	21,55	21,31	23,96	22,21	23,83	22,54	24,08	21,88	24,45	23,84	21,05	20,91	22,74	21,9	21,65	22,25	23,9	25,08	23,4	21,6
<b>comparação digital vs cura</b>																					
espessura da camada	-11%	-7%	-14%	-2%	-5%	-13%	-3%	-4%	3%	7%	-3%	-17%	-14%	-11%	-19%	-2%	0%	7%	-11%	-2%	-5%
dimensão x	-7%	-6%	-6%	-7%	-7%	-7%	-7%	-7%	-7%	-7%	-8%	-7%	-7%	-7%	-8%	-7%	-6%	-7%	-8%	-7%	-7%
dimensão y	-15%	-11%	-10%	-9%	-9%	-13%	-10%	-7%	-9%	-8%	-10%	-11%	-10%	-7%	-12%	-9%	-10%	-9%	-8%	-10%	-12%
dimensão z	-14%	-17%	-18%	-11%	-17%	-12%	-17%	-12%	-17%	-15%	-12%	-18%	-19%	-17%	-15%	-16%	-17%	-11%	-12%	-17%	-17%
<b>comparação cura vs forno</b>																					
espessura da camada	-23%	-10%	-6%	-7%	-14%	-11%	-21%	-15%	-11%	-10%	-13%	-14%	-5%	-10%	-14%	-15%	-10%	-12%	-15%	-13%	-7%
dimensão x	-7%	-6%	-6%	-6%	-6%	-6%	-5%	-6%	-6%	-6%	-6%	-6%	-7%	-6%	-6%	-6%	-6%	-6%	-3%	-6%	-7%
dimensão y	-6%	-7%	-10%	-6%	-9%	-8%	-7%	-6%	-7%	-7%	-6%	-6%	-7%	-8%	-7%	-7%	-6%	-6%	-7%	-7%	-7%
dimensão z	-12%	-13%	-14%	-15%	-15%	-14%	-13%	-13%	-12%	-13%	-14%	-14%	-14%	-13%	-14%	-14%	-15%	-14%	-14%	-15%	-13%
peso	-8%	-8%	-8%	-7%	-8%	-8%	-8%	-8%	-8%	-8%	-8%	-8%	-7%	-8%	-8%	-8%	-7%	-8%	-8%	-8%	-8%
<b>comparação digital vs físico</b>																					
espessura da camada	-32%	-17%	-19%	-9%	-18%	-22%	-23%	-18%	-8%	-4%	-16%	-29%	-19%	-20%	-31%	-17%	-11%	-6%	-24%	-14%	-12%
dimensão x	-13%	-11%	-12%	-13%	-13%	-12%	-12%	-13%	-12%	-12%	-13%	-12%	-13%	-13%	-14%	-12%	-12%	-12%	-11%	-12%	-13%
dimensão y	-20%	-17%	-19%	-14%	-18%	-20%	-16%	-13%	-15%	-15%	-16%	-16%	-16%	-15%	-18%	-15%	-16%	-15%	-15%	-16%	-17%
dimensão z	-24%	-28%	-29%	-24%	-29%	-24%	-28%	-24%	-27%	-26%	-24%	-30%	-30%	-28%	-27%	-28%	-29%	-24%	-24%	-29%	-28%



ARCO 2	A2_01	A2_02	A2_03	A2_04	A2_05	A2_06	A2_07	A2_08	A2_09	A2_10
<b>modelo digital</b>										
espessura da camada	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00
altura da camada	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50
afastamento entre linhas	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90
dimensão x	235,20	226,00	250,00	245,10	229,80	235,60	236,30	247,70	227,90	235,20
dimensão y	262,80	271,90	268,90	265,00	261,20	261,90	265,00	269,60	271,40	262,50
dimensão z	28,50	28,50	28,50	28,50	28,50	28,50	28,50	28,50	28,50	28,50
<b>cerâmica</b>										
tipo de crâmica	Grês 130MP	Grês 130MP	Grês 130MP	Grês 130MP	Grês 130MP	Grês 130MP	Grês 130MP	Grês 130MP	Grês 130MP	Grês 130MP
água (%)	30 - 35	30 - 35	30 - 35	30 - 35	30 - 35	30 - 35	30 - 35	30 - 35	30 - 35	30 - 35
<b>modelo impresso</b>										
espessura da camada - após cura (mm)	2,54	2,94	2,80	3,14	2,77	2,81	2,62	3,12	3,10	3,06
espessura da camada - após ida ao forno (mm)	2,35	2,47	2,50	2,80	2,56	2,25	2,25	2,58	2,61	2,60
altura da camada perceptível - após cura (mm)	1,46	1,42	1,46	1,29	1,25	1,25	1,30	1,26	1,40	1,36
tempo de impressão (min.)										
peso - após cura (g)	312,90	351,80	329,50	364,30	354,80	343,90	366,10	449,50	395,30	394,90
peso - após ida ao forno (g)	290,30	326,50	305,70	338,00	329,10	319,20	339,40	417,00	366,60	366,30
dimensão x - após cura (mm)	217,50	208,50	228,00	230,50	215,00	221,00	222,50	234,50	216,00	221,50
dimensão y - após cura (mm)	241,00	250,50	249,00	241,50	237,00	232,50	240,00	245,50	249,50	241,00
dimensão z - após cura (mm)	25,05	26,10	26,61	23,11	23,60	24,24	23,45	25,04	24,34	24,26
dimensão x - após ida ao forno (mm)	203,6	196	214	216,5	202,3	207	218,5	219	202	207
dimensão y - após ida ao forno (mm)	226	234,5	233	225,8	222,2	221	224,8	228	232	225
dimensão z - após ida ao forno (mm)	21,75	22,75	22,85	19,99	20,29	20,93	20,1	21,51	21,07	21,27
<b>comparação digital vs cura</b>										
espessura da camada (mm)	-15%	-2%	-7%	5%	-8%	-6%	-13%	4%	3%	2%
dimensão x	-8%	-8%	-9%	-6%	-6%	-6%	-6%	-5%	-5%	-6%
dimensão y	-8%	-8%	-7%	-9%	-9%	-11%	-9%	-9%	-8%	-8%
dimensão z	-12%	-8%	-7%	-19%	-17%	-15%	-18%	-12%	-15%	-15%
<b>comparação cura vs forno</b>										
espessura da camada (mm)	-7%	-16%	-11%	-11%	-8%	-20%	-14%	-17%	-16%	-15%
dimensão x	-6%	-6%	-6%	-6%	-6%	-6%	-2%	-7%	-6%	-7%
dimensão y	-6%	-6%	-6%	-7%	-6%	-5%	-6%	-7%	-7%	-7%
dimensão z	-13%	-13%	-14%	-14%	-14%	-14%	-14%	-14%	-13%	-12%
peso	-7%	-7%	-7%	-7%	-7%	-7%	-7%	-7%	-7%	-7%
<b>comparação digital vs físico</b>										
espessura da camada (mm)	-22%	-18%	-17%	-7%	-15%	-25%	-25%	-14%	-13%	-13%
dimensão x	-13%	-13%	-14%	-12%	-12%	-12%	-8%	-12%	-11%	-12%
dimensão y	-14%	-14%	-13%	-15%	-15%	-16%	-15%	-15%	-15%	-14%
dimensão z	-24%	-20%	-20%	-30%	-29%	-27%	-29%	-25%	-26%	-25%

Anexo 3. Peça A1\_01

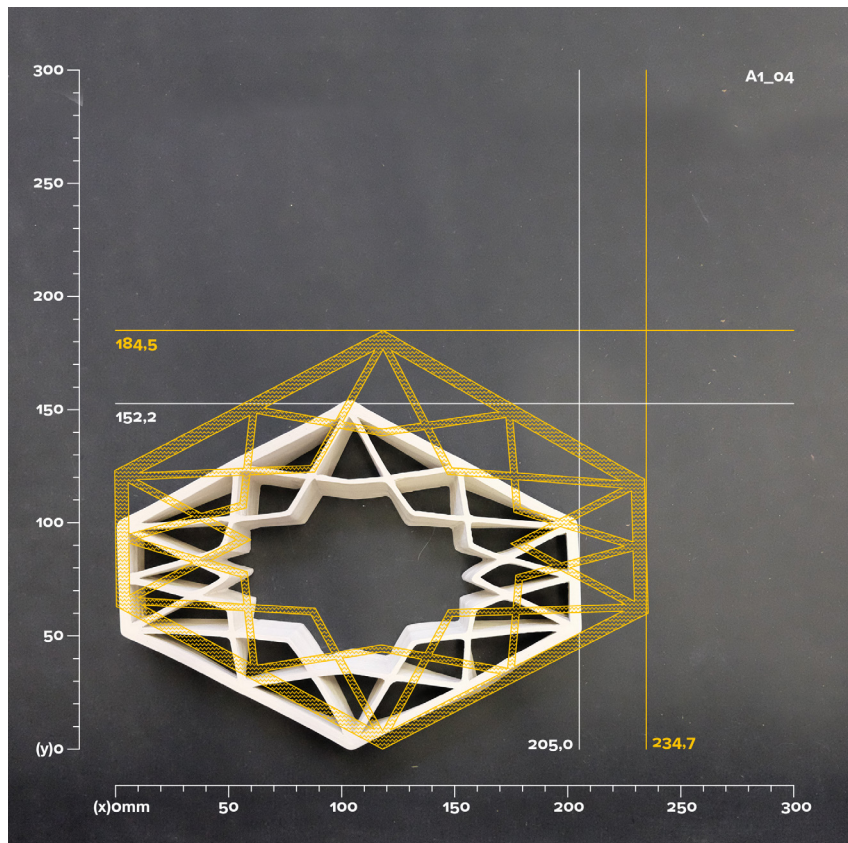
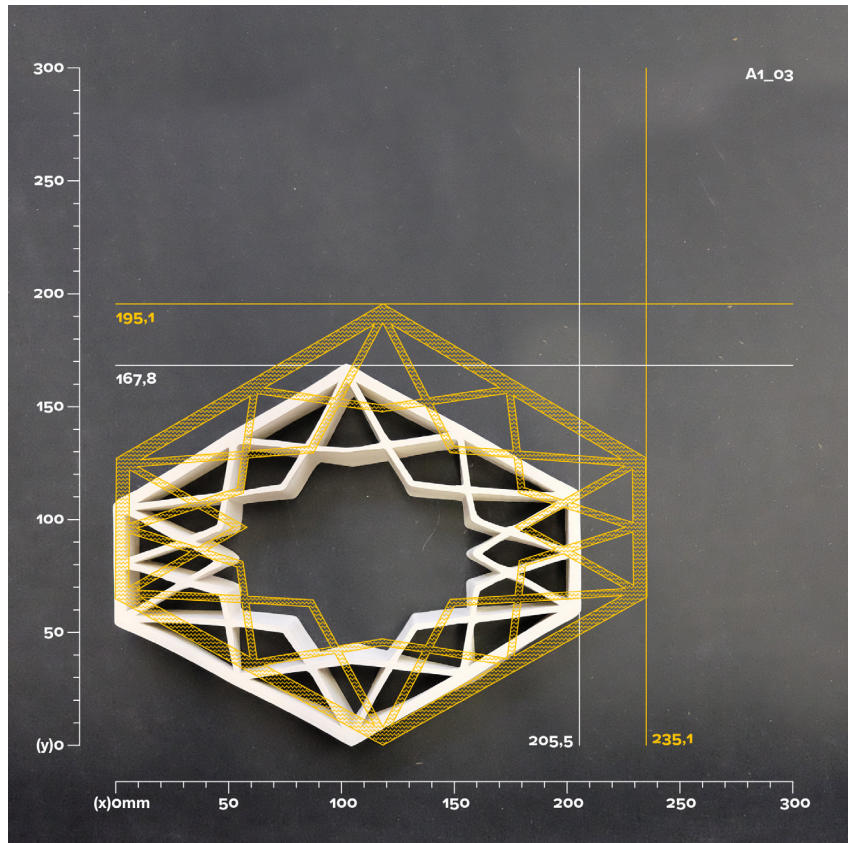
Anexo 4. Peça A1\_02





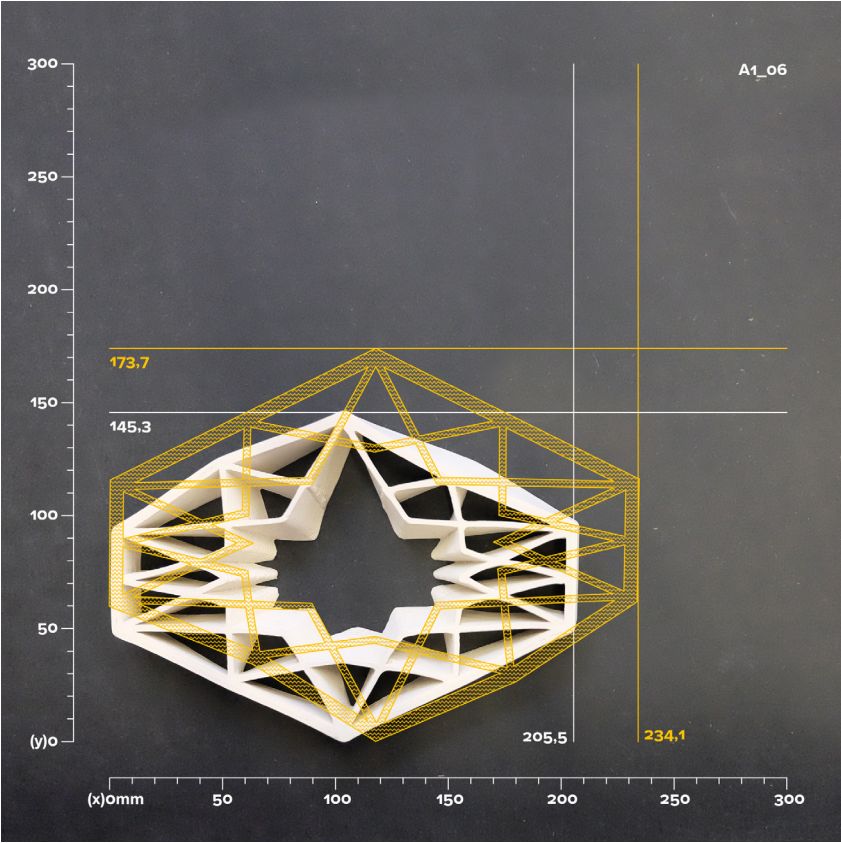
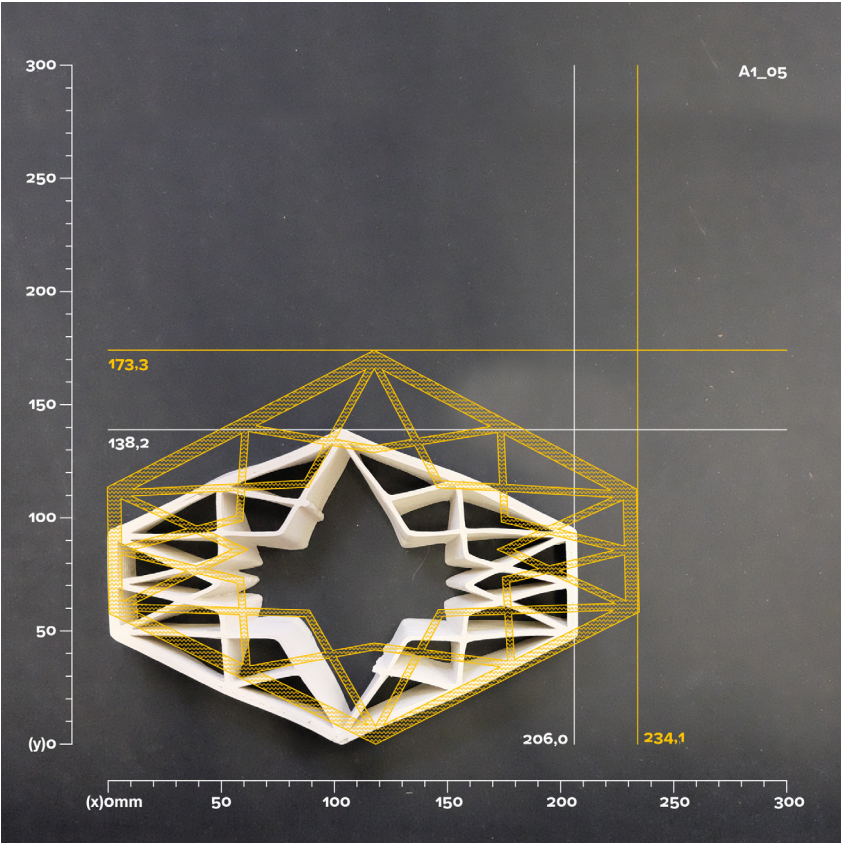
Anexo 5. Peça A1\_03

Anexo 6. Peça A1\_04



Anexo 7. Peça A1\_05

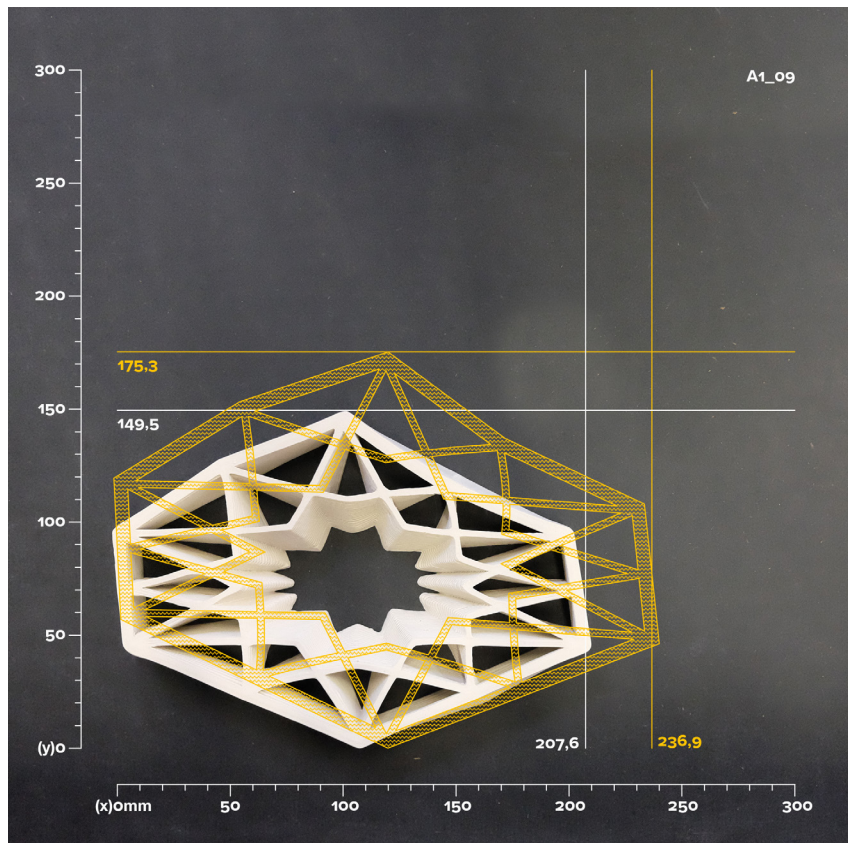
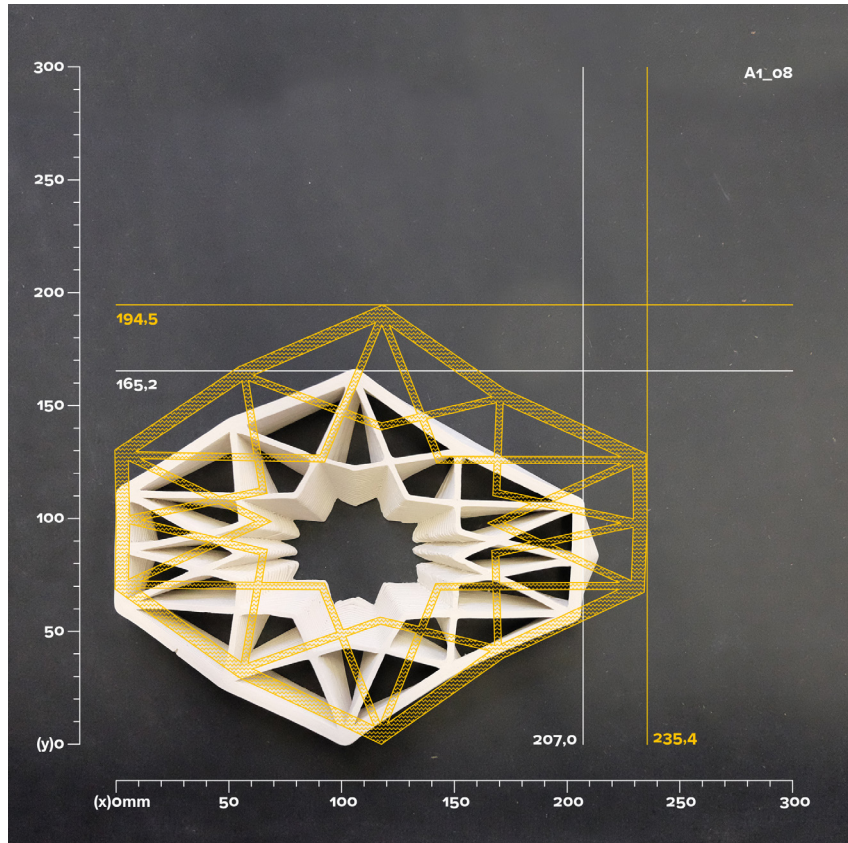
Anexo 8. Peça A1\_06





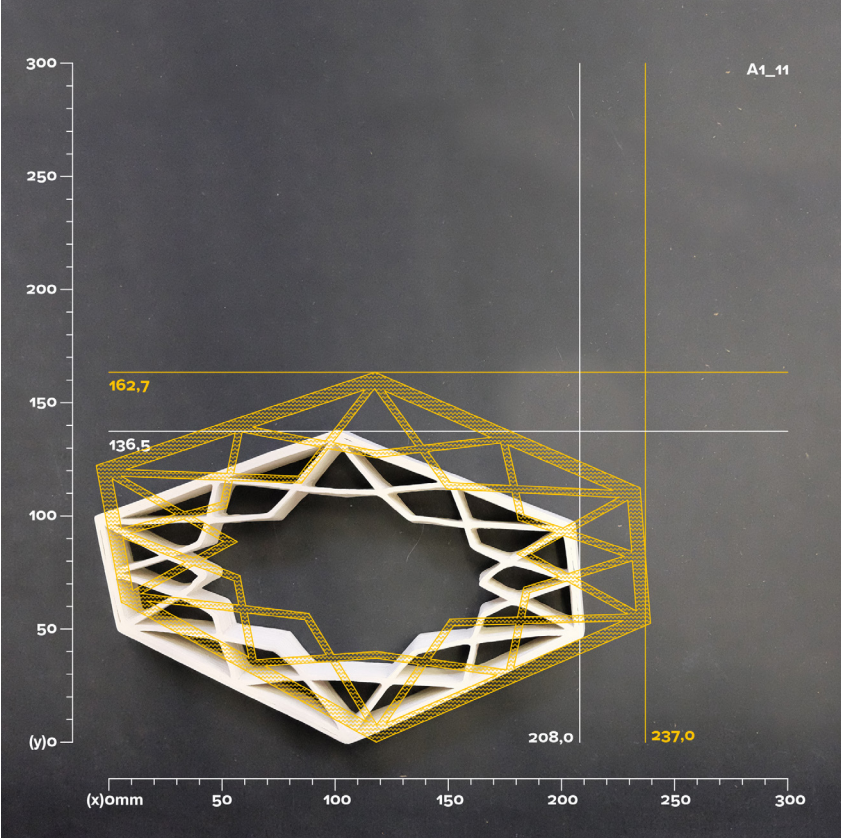
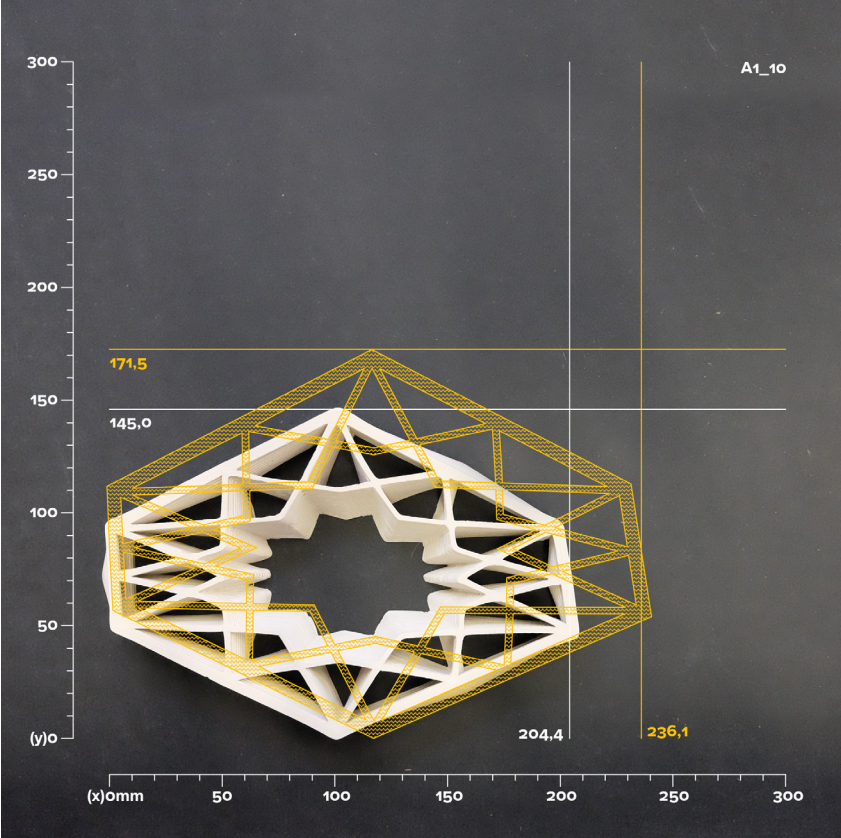
Anexo 9. Peça A1\_08

Anexo 10. Peça A1\_09



Anexo 11. Peça A1\_10

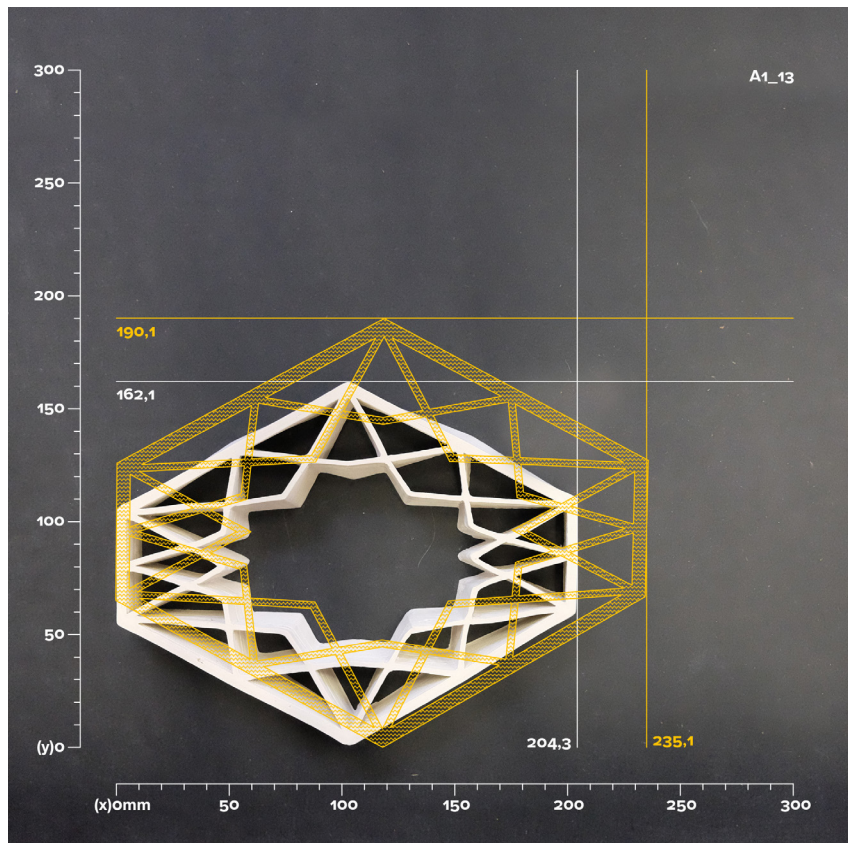
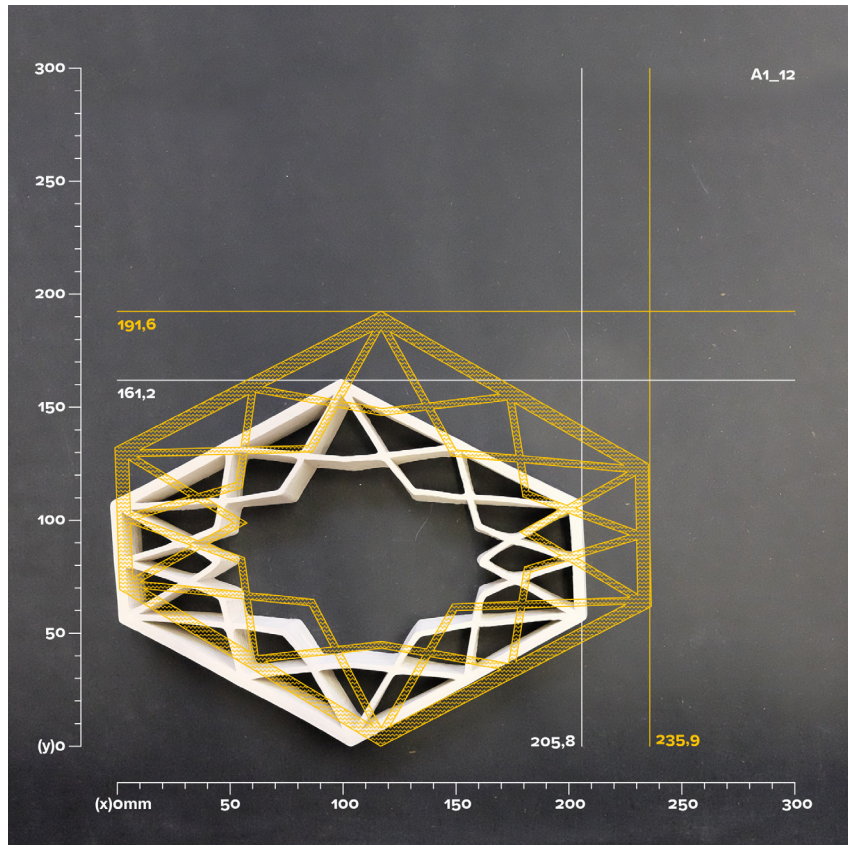
Anexo 12. Peça A1\_11





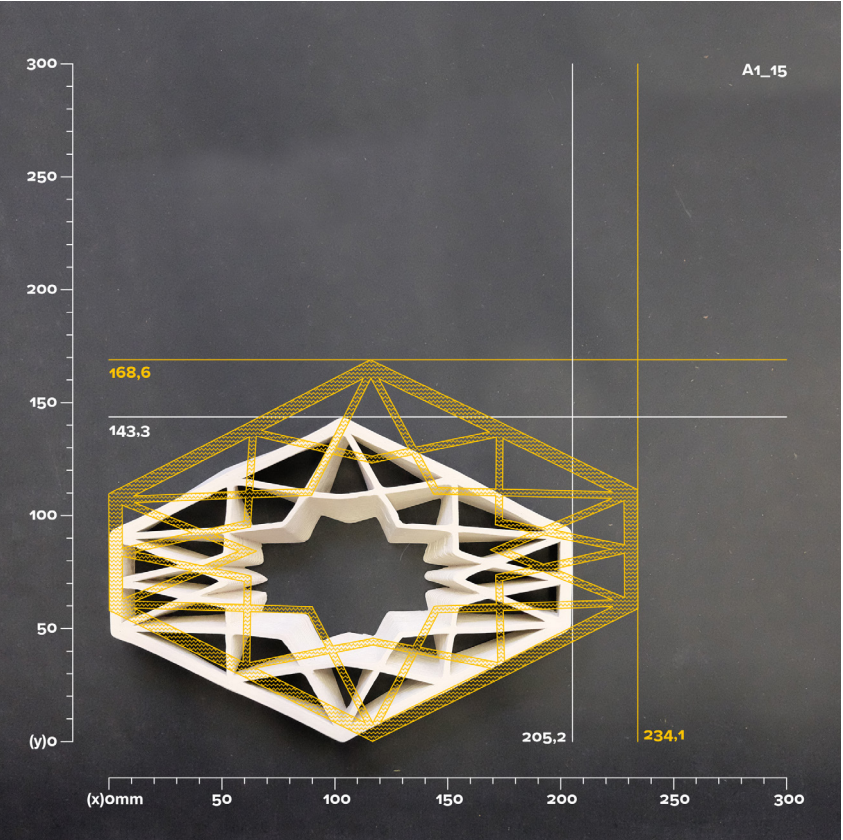
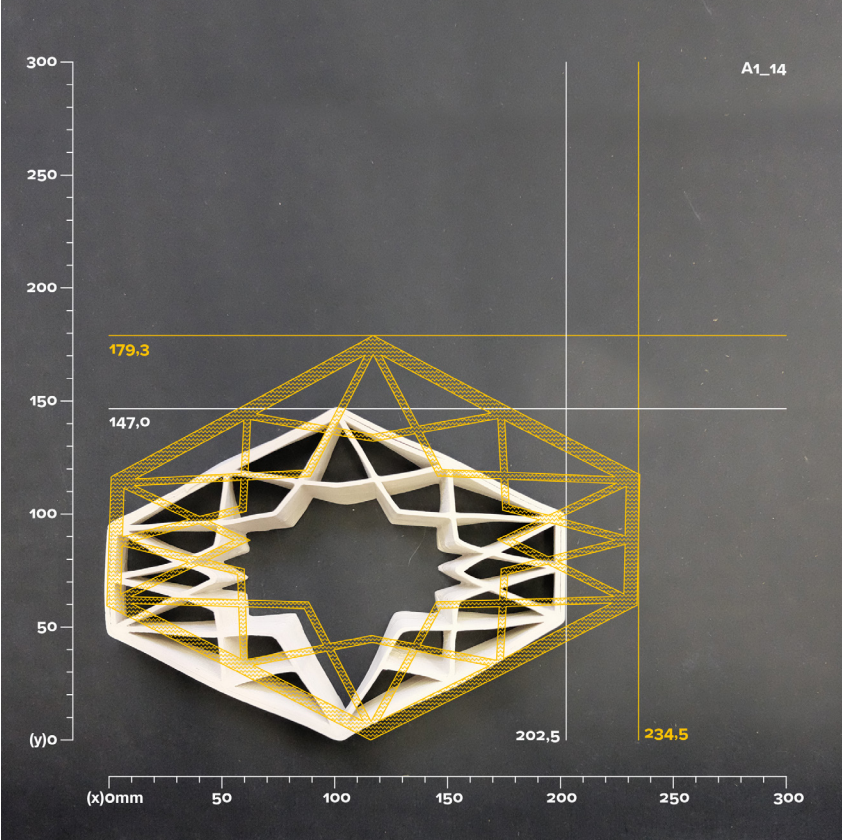
Anexo 13. Peça A1\_12

Anexo 14. Peça A1\_13



Anexo 15. Peça A1\_14

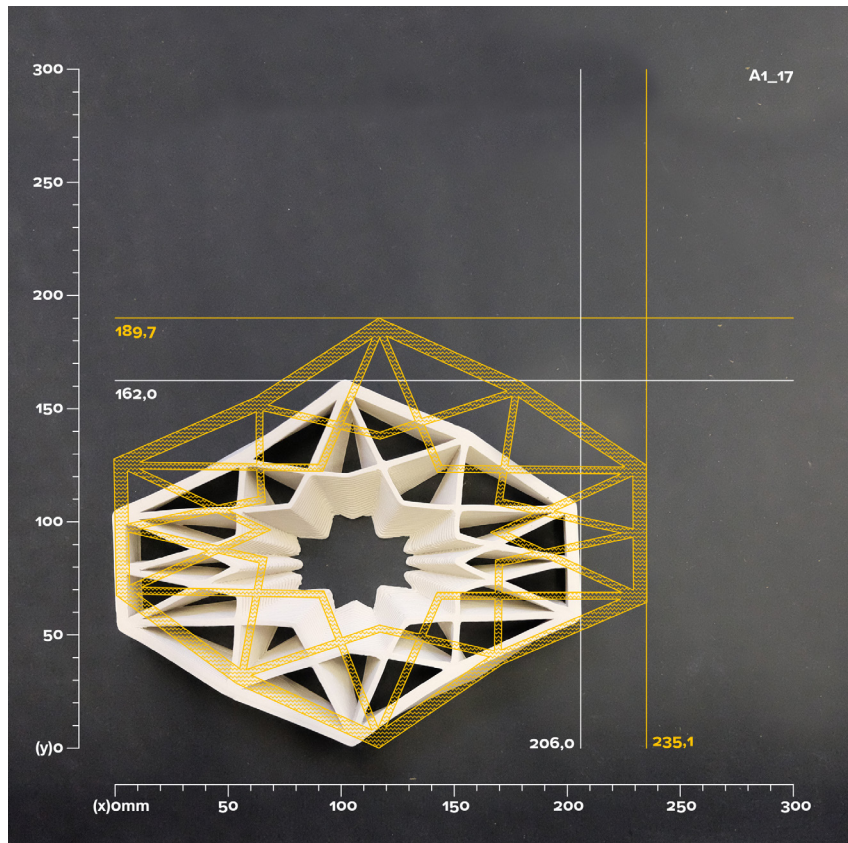
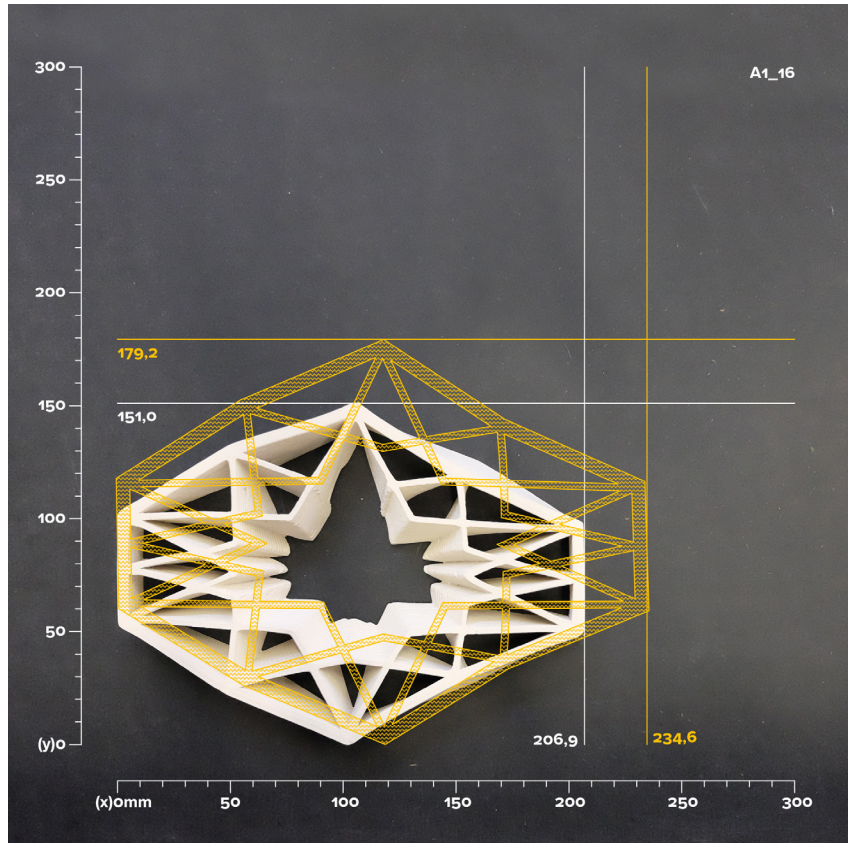
Anexo 16. Peça A1\_15





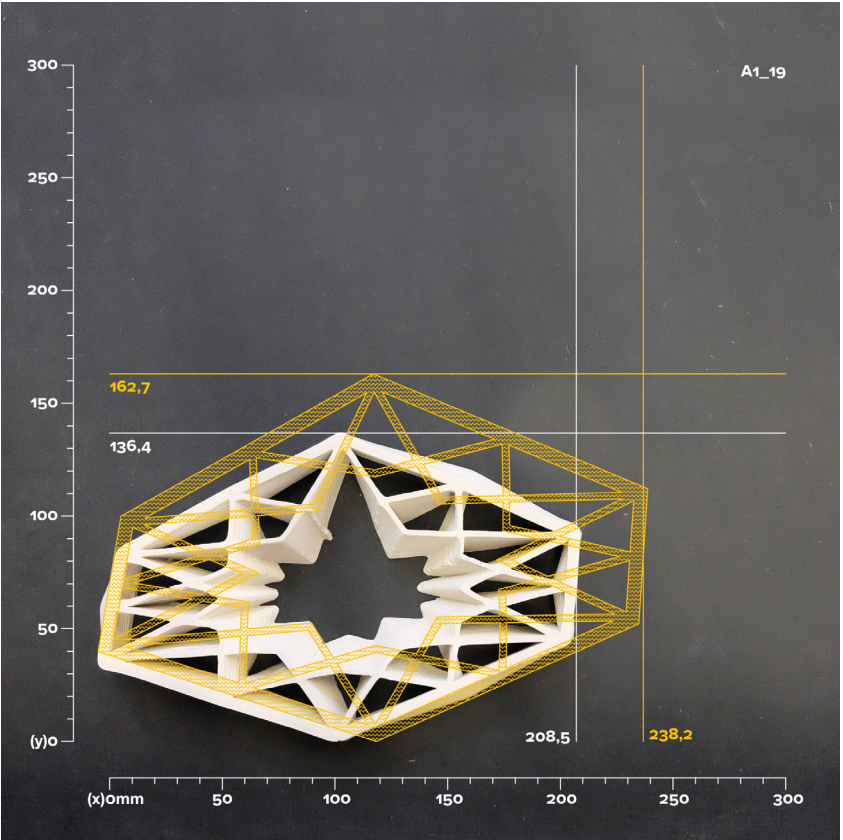
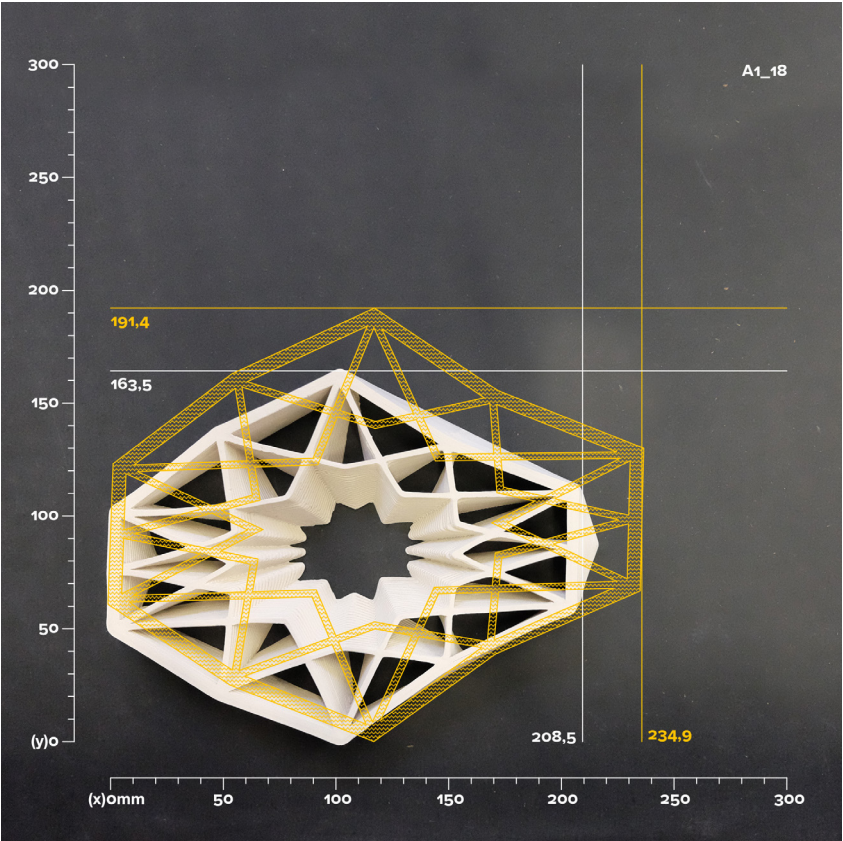
Anexo 17. Peça A1\_16

Anexo 18. Peça A1\_17



Anexo 19. Peça A1\_18

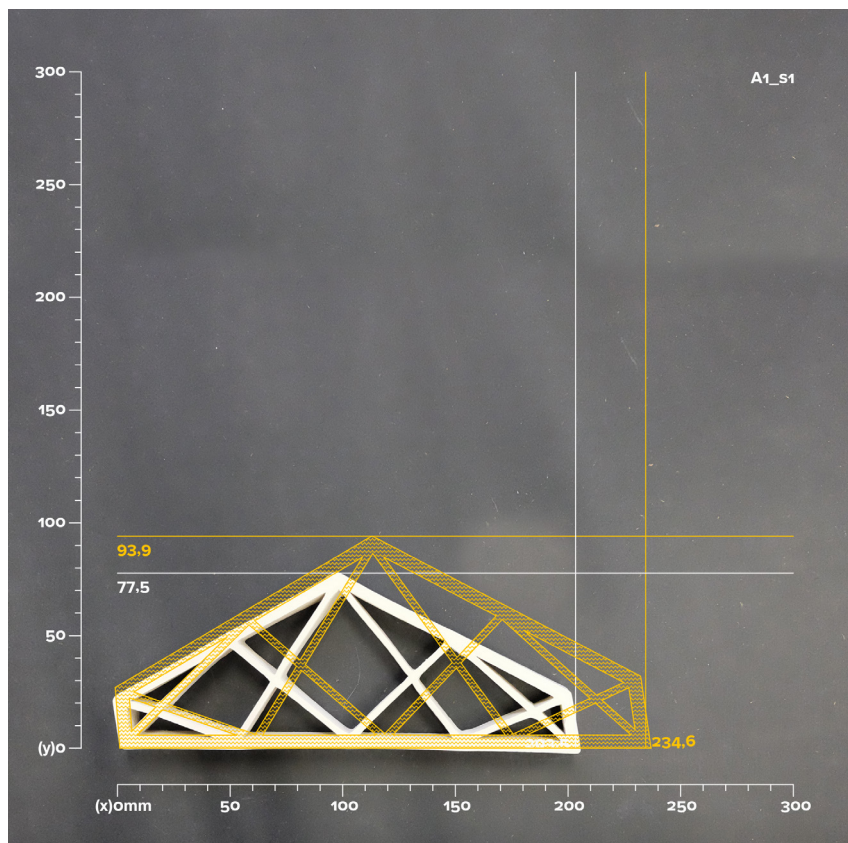
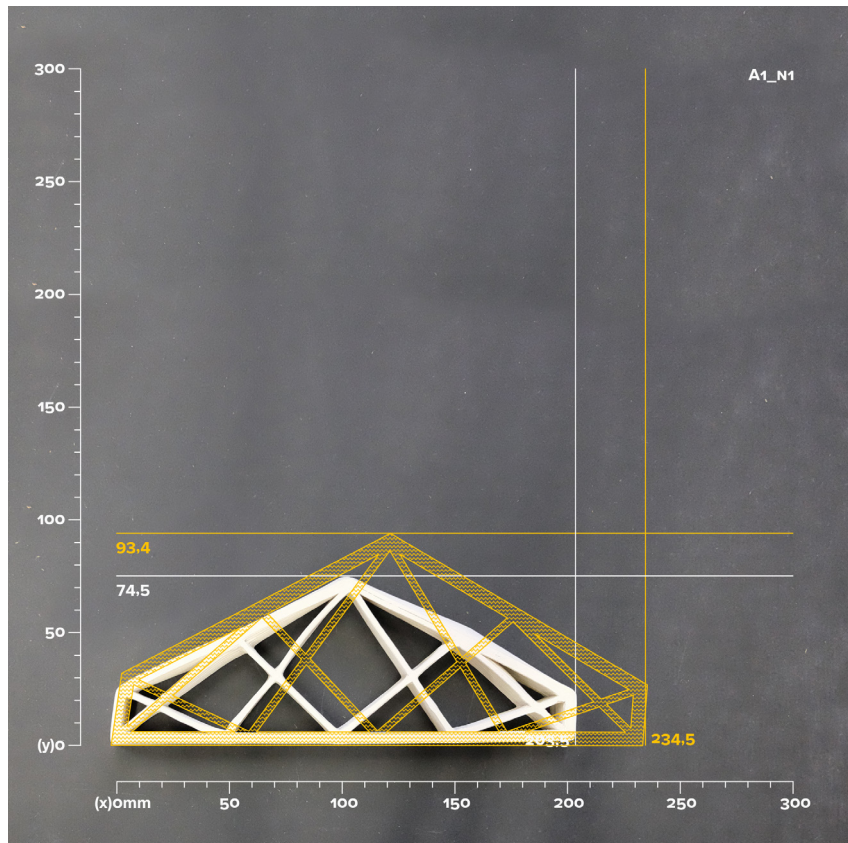
Anexo 20. Peça A1\_19





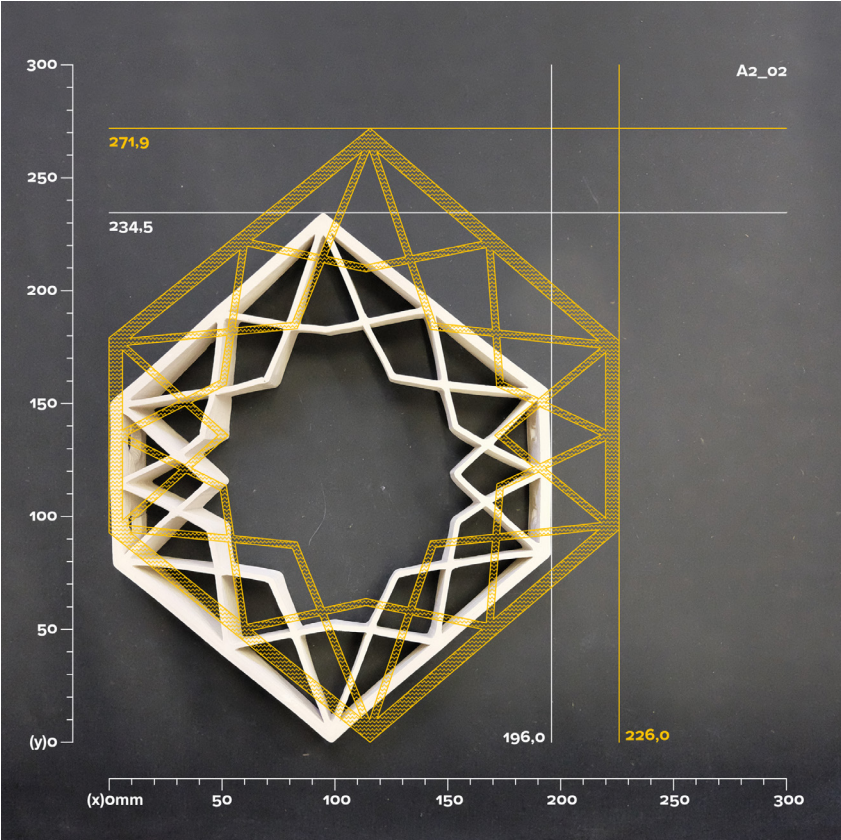
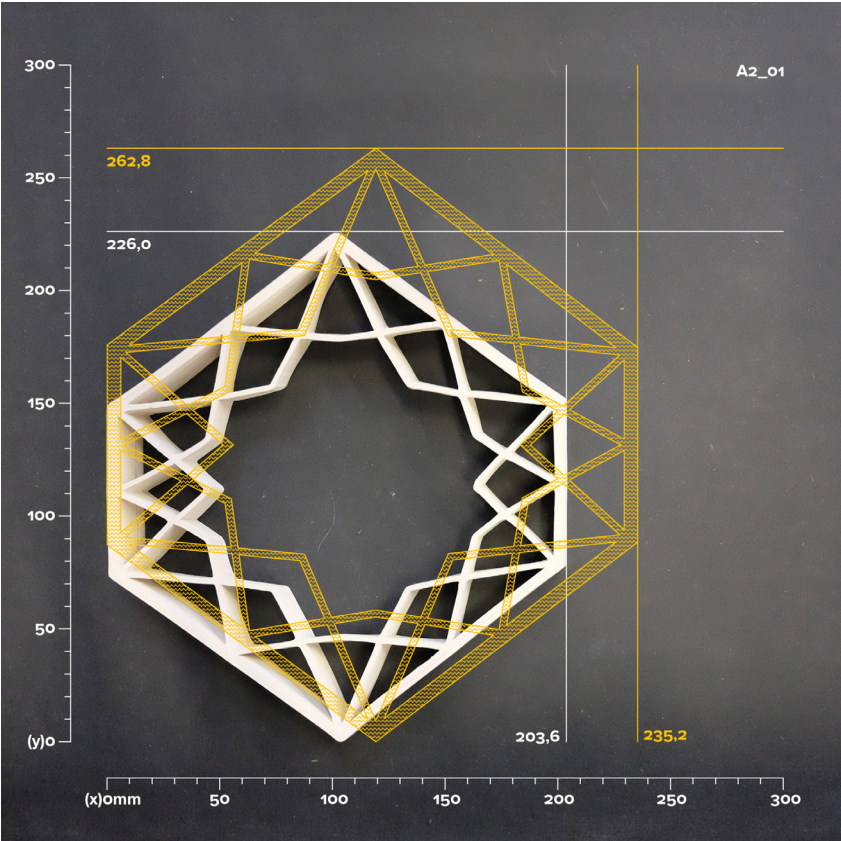
Anexo 21. Peça A1\_N1

Anexo 22. Peça A1\_S1



Anexo 23. Peça A2\_01

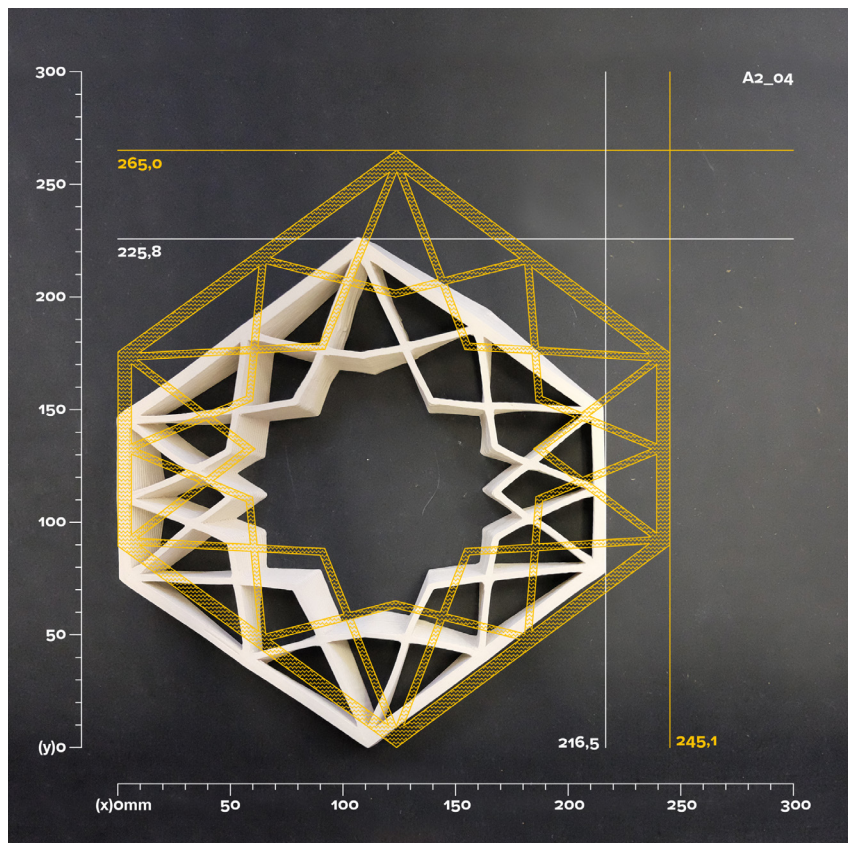
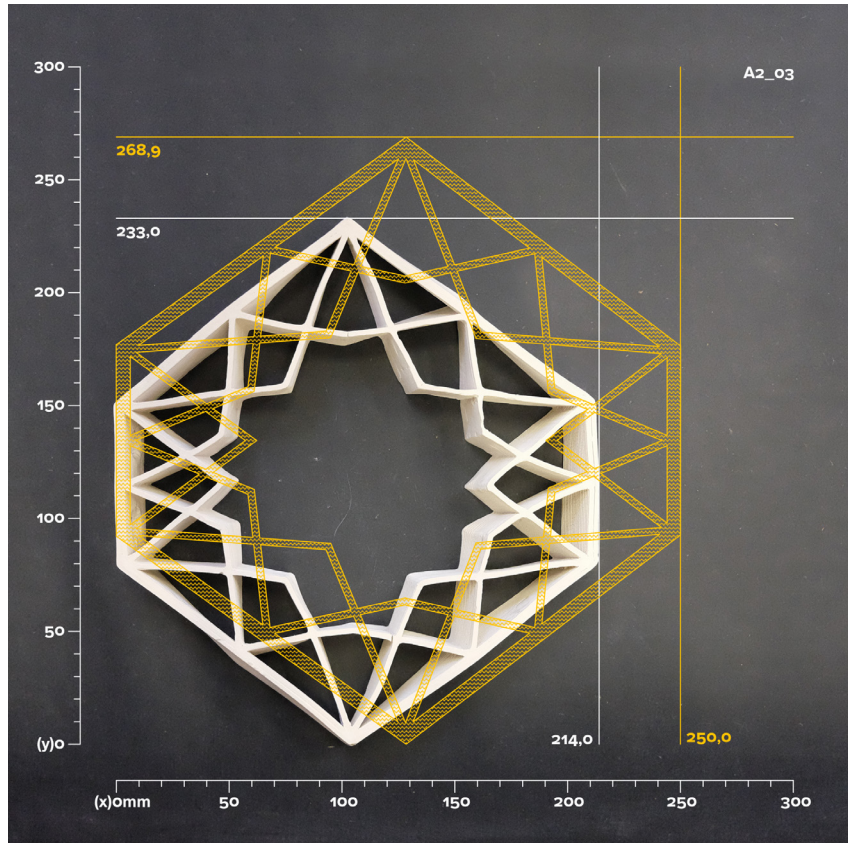
Anexo 24. Peça A2\_02





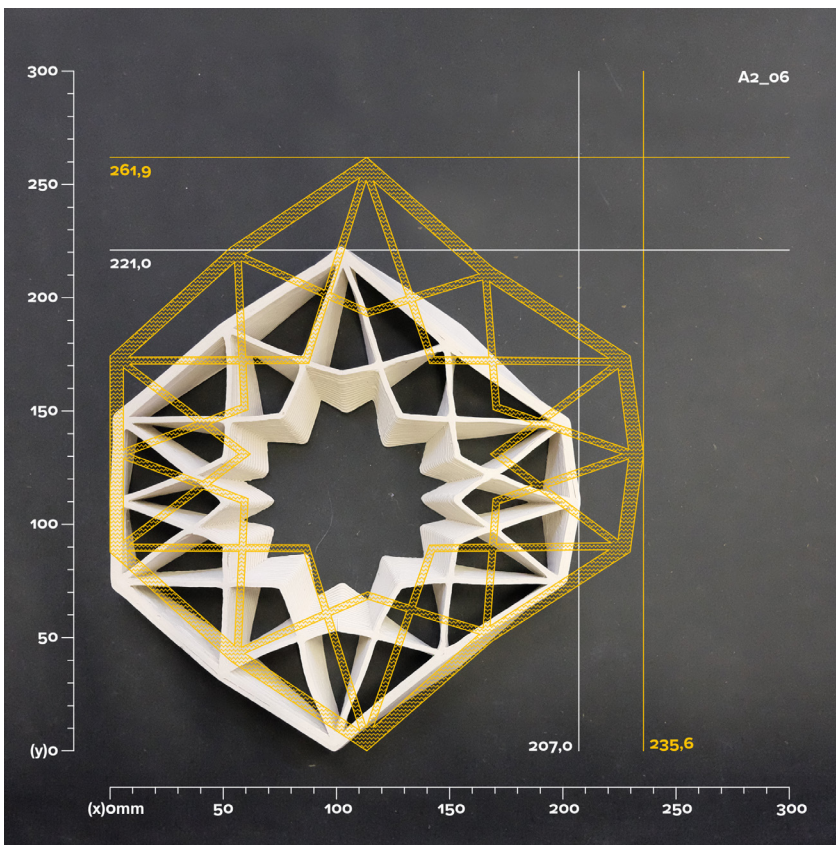
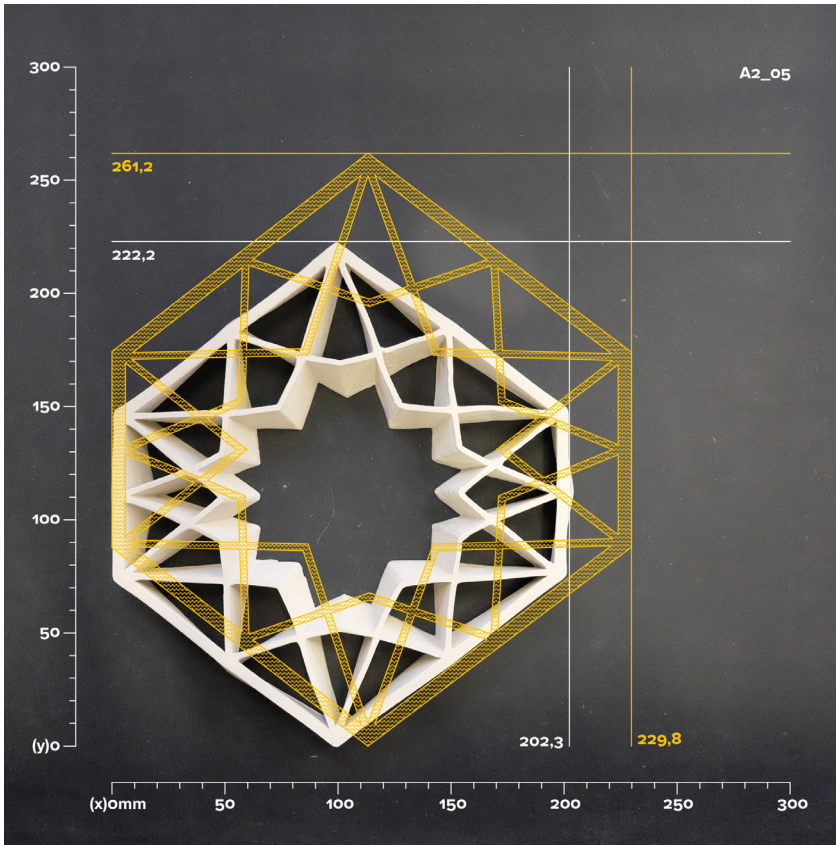
Anexo 25. Peça A2\_03

Anexo 26. Peça A2\_04



Anexo 27. Peça A2\_05

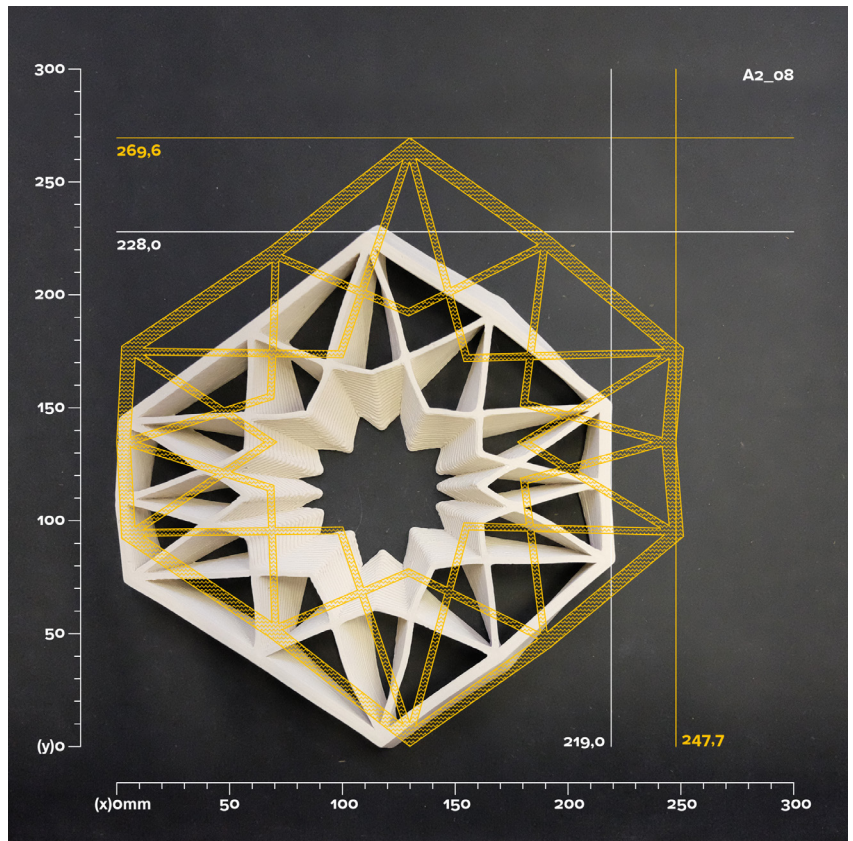
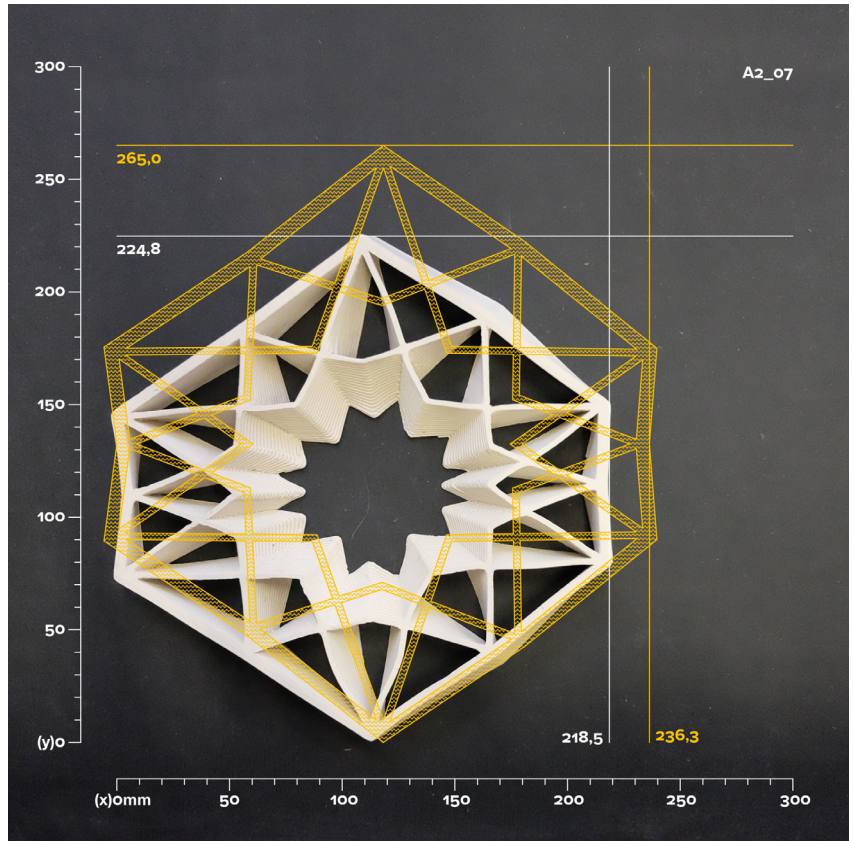
Anexo 28. Peça A2\_06





Anexo 29. Peça A2\_07

Anexo 30. Peça A2\_08



Anexo 31. Peça A2\_09

Anexo 32. Peça A2\_10

