



**Universidade do Minho**  
Escola de Arquitectura

Tatiana Vilaça Campos

**Exploração da utilização de pasta de papel  
na fabricação aditiva em Arquitectura**

Tese de Mestrado  
Construção e Tecnologia

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

# Declaração

**Nome.** Tatiana Vilaça Campos

**Endereço eletrónico.** tati\_6228@hotmail.com

**Telefone.** 912425177

**Bilhete de indentidade / cartão de cidadão.** 14837536

**Título da tese.** Exploração da utilização de pasta de papel na fabricação aditiva em Arquitetura

**Equipa de orientação.**

Professor Doutor Bruno Acácio Ferreira Figueiredo

Professor Doutor Paulo Jorge Sousa Cruz

**Ano de conclusão.** 2019

**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, 30 de Janeiro de 2019

**Assinatura.**



# Agradecimentos

Em primeiro lugar gostaria de agradecer à minha equipa de orientação, o Professor Bruno Figueiredo e o Professor Paulo Cruz, que sempre me apoiaram e ensinaram no desenrolar de todo o trabalho, proporcionando novos conhecimentos e experiências.

Ao Professor Doutor Carlos de Pascoal Neto do RAIZ (Instituto de investigação da Floresta e do Papel), aos Engenheiros Vitor Crespo e Alexandre Gaspar da The Navigator Company, um obrigada pela cedência do material e troca de informação, que ajudou no desenrolar desta investigação.

Um especial agradecimento aos meus amigos e companheiros de laboratório, João Moreira, Luis Ferreira, João Carvalho e João Ribeiro, por todos os momentos passados de boa disposição, por sempre me apoiarem nos bons e maus momentos e todo o auxílio que disponibilizaram ao longo deste trabalho. Obrigada ‘pequenote’ por me ajudares a desenvolver o desenho computacional, por seres o meu ouvinte e por me lembrares todos os dias que tenho uma música “Hey!! Oh taty...”. Obrigada Luis pelas tuas aulas de serralharia e pelo apoio que me deste no desenvolvimento do código. Os três mosqueteiros.

Ao grande Engenheiro Samuel (com E grande) pelo apoio e disponibilidade no laboratório, por me ajudar a desenvolver o meu protótipo, pelas suas histórias engraçadas e pelas horas de almoço bem passadas.

Aos meus amigos que me acompanharam ao longo destes cinco anos, por sempre acreditarem e depositarem confiança em mim. Um obrigada especial ao João Brandão e à Elsa Gonçalves.

Por fim, aos meus pais, por me proporcionarem esta experiência maravilhosa, por sempre acreditarem que conseguiria alcançar todos os meus sonhos, por me darem forças nos bons e maus momentos e por demonstrarem todos os dias que sou o vosso orgulho. À minha Dani por nunca me deixar desistir e ser a minha fiel seguidora. À ‘tia’ Júlia por me apoiar, por ser a minha ouvinte e me dar força quando mais precisava.

**Obrigado.**



# Resumo

Considerando uma abordagem transformadora na indústria, as técnicas de fabrico aditivo (FA) transformaram várias áreas ao longo das últimas décadas, como a arquitetura e a engenharia, no que toca à produção de sistemas e revestimentos mais complexos. Estes fatores foram executáveis devido à constante evolução tecnológica, conseguida através da alteração do paradigma do pensamento analógico-digital. O 'fabrico aditivo' é um processo de transformação que advém de um desenho digital e rematasse num modelo físico, culminando a capacidade de criação de um modelo tridimensional por meio da adição do próprio material - Aditivo. Denominar este processo de 'impressão 3D' ou 'prototipagem rápida' é incorreto, uma vez que estes dois termos na realidade são duas vertentes que surgiram do FA. Cada objeto produzido para prototipagem é digitalmente definido pela utilização de softwares Computer Aided Design (CAD), onde, através da geração de um código é possível "fatiar" o objeto para a sua produção. Embora as técnicas de FA possam suscitar surpresas para alguns utilizadores, a sua existência remota à várias décadas, sofrendo assim constantes evoluções transversalmente ao desenvolvimento tecnológico. Quando aplicadas em determinados contextos oferecem elevadas vantagens, maiormente na obtenção de modelos com um elevado rigor e detalhe.

A pesquisa de 'novos' materiais é possível, se se constatar que ao longo desta investigação, é pretendido aumentar o conhecimento, adquirido até à data, para possíveis misturas compósitas oportunas para utilização em arquitetura. Graças às tecnologias de fabrico aditivo e à integração de processos de modelação tridimensional, a celulose, efetivamente pode ser considerada uma nova possibilidade para a produção de elementos arquitetónicos quando adicionada estrategicamente com determinados materiais. O desenvolvimento de variadas misturas poderá beneficiar o campo tecnológico, mais concretamente a impressão 3D e prototipagem rápida, através da laboração de uma pasta possível de utilizar para a personalização de componentes arquitetónicos, com baixos custos de produção.

O principal caso de estudo desta investigação centra-se no desenvolvimento de uma parede modular, que utiliza como base blocos hexagonais regulares. Será desenvolvida com o intuito de compilar todos os resultados obtidos com o estudo da celulose e a possibilidade de união a outros materiais. Toda a parede será engendrada através de razões

paramétricas, recorrendo a programas computacionais, fazendo-se variar a geometria de cada bloco segundo parâmetros definidos.

**Palavras-chave.** Celulose, Argila, Fabrico Aditivo, Tecnologias digitais e Impressão 3D.

# Abstract

Considering a transformative approach in the industry, additive manufacturing (AM) techniques have been transforming several areas in the past decades, such as architecture and engineering, regarding systems productions and complex coatings. These factors were executable due to the constant technological evolution, achieved through the alteration of the paradigm of analogical-digital thinking. The 'additive manufacturing' is a process of transformation that accrues from a digital design and comes into a physical model, culminating the ability to create a three - dimensional model through the addition of the material itself - Additive. To name this process of '3D printing' or 'rapid prototyping' is incorrect, since these two terms are actually two strands that arose from the AM. Each object produced for prototyping is digitally defined by the use of Computer Aided Design (CAD) software, where, through the generation of a code, it is possible to "slice" the object for its production. Although the AM techniques can cause surprises for some users, their existence is remote for several decades, thus suffering constant changes across technology development. When applied in certain contexts they might offer high advantages, mainly by obtaining models with high rigor and detail.

The research of 'new' materials is possible, has it has been verified throughout this investigation, it is intended to increase the knowledge, acquired so far, for possible composite mixtures suitable for architecture use. Thanks to the technologies of additive manufacturing and the integration of three-dimensional modeling processes, cellulose can effectively be considered as a new possibility at the production of architectural elements when added strategically with certain materials. The development of various mixes could benefit the technological field, namely 3D printing and rapid prototyping, by working with a paste that can be used for personal customization in architectural components, regarding low cost production.

The main case on this research focuses on the development of a modular wall, which uses regular hexagonal blocks as base. It will be developed with the purpose of compiling all the results obtained with the study of cellulose and the possibility of union with other materials. The entire wall will be generated through parametric reasons, using computational programs, by making the geometry of each block vary according to defined parameters.

**Keywords.** Cellulose, Clay, additive Manufacturing, Digital Technologies and 3D Printing.



# Índice

<b>1.</b>	<b>Introdução.</b>	<b>001</b>
1.1.	Tema e problemática.	003
1.2.	Objetivos e considerações gerais.	005
1.3.	Organização da tese.	007
1.4.	Metodologia de trabalho.	009
<b>2.</b>	<b>Enquadramento.</b>	<b>013</b>
2.1.	Tecnologia de Fabrico aditivo.	015
2.2.	Fabrico Aditivo com celulose.	021
2.3.	Fabrico Aditivo com argila.	031
<b>3.</b>	<b>O papel e a celulose.</b>	<b>039</b>
3.1.	A produção do papel.	041
3.2.	A celulose.	045
3.2.1.	Pasta acabada de celulose em folha branca.	046
3.2.2.	Pasta de celulose em pó branqueada.	046
3.3.	A aplicação do papel.	049
3.3.1.	Materiais de construção em arquitetura.	049
3.3.2.	Outros campos de aplicação.	051
<b>4.</b>	<b>Materiais e testes de extrusão.</b>	<b>055</b>
4.1.	Introdução.	057
<b>4.2.</b>	<b>A celulose e o amido.</b>	<b>061</b>
4.2.1.	Estudos prévios.	063
4.2.2.	Preparação do amido.	067
<b>4.2.3.</b>	<b>Mistura A.</b>	<b>071</b>
	Impressão.	074
	Secagem.	076
	Acabamento.	078
<b>4.2.4.</b>	<b>Mistura B.</b>	<b>081</b>
	Impressão.	084
	Secagem.	088
	Acabamento.	091
<b>4.2.5.</b>	<b>Mistura B.1.</b>	<b>093</b>
	Impressão.	096
	Secagem.	098

Acabamento.	100
4.2.6. Conclusões.	103
<b>4.3. A celulose e a argila.</b>	<b>107</b>
4.3.1. Estudos prévios.	109
<b>4.3.2. Mistura C.</b>	<b>113</b>
Impressão.	117
Secagem.	120
Acabamento.	125
<b>4.3.3. Mistura D.</b>	<b>127</b>
Impressão.	128
Secagem.	133
Acabamento.	135
4.3.4. Conclusões.	137
<b>5. Protótipo de uma parede.</b>	<b>143</b>
5.1. Ideia   Conceito.	145
5.2. Definição do modelo computacional paramétrico.	147
5.2.1. Geração da malha hexagonal e suas variações.	149
5.2.2. Geração das pirâmides truncadas inferiores.	153
5.2.3. Geração das pirâmides truncadas superiores.	159
5.3. G-Code.	165
5.4. Fabrico aditivo do modelo.	167
5.4.1. Impressão.	169
5.4.2. Secagem.	173
5.4.2.1. Estudo da Retração.	177
5.4.2.2. Estudo da Deformação.	181
5.4.3. Acabamento.	185
5.4.4. Ligações.	187
5.5. Produto Final.	191
<b>6. Conclusão.</b>	<b>197</b>
6.1. Trabalhos futuros.	201
<b>7. Bibliografia.</b>	<b>205</b>
<b>8. Anexos.</b>	<b>211</b>







# Índice de figuras

**Esquema 1.01.** Esquema representativo dividido ao longo de cinco fases de estudo, com o objetivo de demonstrar a metodologia de trabalho adotada em cada uma dessas fases, com o mesmo propósito final, obtenção de misturas à base de celulose para aplicação no FA.

**Figura 2.01.** The Complete Guide to Stereolithography (SLA) in 3D Printing, desconhecido, 2017. Retirado do site: [www.3dnatives.com](http://www.3dnatives.com)

**Figura 2.02.** Binder Jetting process printer, Tyler Koslow, 2016. Retirada do site: [www.3dprintingindustry.com](http://www.3dprintingindustry.com)

**Figura 2.03.** Mcor Technologies printer, Mcor Technologies, 2014. Retirada do site: [www.flickr.com](http://www.flickr.com)

**Figura 2.04.** How does an FDM printer work?, Equipe Kimya, 2018. Retirada do site: [www.kimya.fr](http://www.kimya.fr)

**Figura 2.05.** Paste extrusion with a 3D potterbot, Emerging Objects, 2017. Retirado do site: [www.emergingobjects.com](http://www.emergingobjects.com)

**Figura 2.06** Pulp mold Block, Kazuhiko Hayakawa, 2016. Retirado do site: [www.kazuhikohayakawa.com](http://www.kazuhikohayakawa.com)

**Figura 2.07.** A utilização dos tubos de papel, para a produção de uma habitação, desconhecido, desconhecido. Retirado do site: [www.44arquitetura.com.br](http://www.44arquitetura.com.br)

**Figura 2.08.** Impressão de objetos reais em papel “Impressora 3D adiciona detalhes realistas em objetos de papel”, Mcor, 2014.

**Figura 2.09.** Ronald Rael e Anthony Giannini estão a desenvolver papel impresso em 3D feito de papel de jornal reciclado, Kent Wilson, 2014. Retirado do site: [www.archidaily.com.br](http://www.archidaily.com.br)

**Figura 2.10.** Tests made with Comau NJ60 6 axis robotic arm, Co.de.iT, 2018.

**Figura 2.11.** Innovation in Paperclay Ceramic Arts, Rosette Gault, 2012.

**Figura 2.12.** Cellulose from wood can be printed in 3D, Peter Widing, 2015.

**Figura 2.13.** (A) Um esquema do processo de impressão de acetato de celulose 3D. (B) Acima da foto próxima do processo. (C) Estágios de acetato evaporando a partir da tinta impressa 3D. (D & e) Estruturas de teste 3D impresso na tinta, Advanced Science News, 2017. Retirado do site: [www.3dprintingindustry.com](http://www.3dprintingindustry.com)

**Figura 2.14.** Jawbone 3D printed with cellulose ink, Empa, 2017. Retirado do site: [www.3dprint.com](http://www.3dprint.com)

**Figura 2.15.** The aguahoja Pavilion, MIT Media Lab, 2018.

**Figura 2.16.** The aguahoja Pavilion, MIT Media Lab, 2018.

**Figura 2.17.** Experiments in thin shell, cast paper structures addressing form-finding fabrication, structural behavior and decay, Georg Rafailidis, 2018.

**Figura 2.18.** Object of the Moment: PaperBricks, WooJai Lee, 2016. Retirado do site: [www.woojai.com](http://www.woojai.com)

**Figura 2.19.** Honeycomb Brick, Building Bytes, 2013.

**Figura 2.20.** Ribbed Brick, Building Bytes, 2013.

**Figura 2.21.** X-BrickBrick, Building Bytes, 2013.

**Figura 2.22.** Muscatese Evaporative cooling window, Emerging Objects, 2015.

**Figura 2.23.** Brick being printed on a desktop 3D printer, HoneyComb Brick, Building Bytes, 2013.

**Figura 2.24.** Cool Brick Wall assembly, Emerging Objects, 2015. retirado do site: [www.emergingobjects.com](http://www.emergingobjects.com)

**Figura 2.25.** Seed Stitch Wall, Emerging Objects, 2016. retirado do site: [www.emergingobjects.com](http://www.emergingobjects.com)

**Figura 2.26.** Mashrabiya tradicional, Jaali in Salim Chishti Tomb, India, Hans A. Rosbach, desconhecido. Retirado do site: [www.starsinsymmetry.wordpress.com](http://www.starsinsymmetry.wordpress.com)

**Figura 2.27.** Mashrabiya moderna, Rashid Al Zayani Mosque, Bahrain, Mustafa A-Hadi, 2018. Retirado do site: [www.mustafaphoto.com](http://www.mustafaphoto.com)

**Figura 2.28.** Wave Wall, Aclab, 2016. Retirado do site: [www.aclab-idegui.org](http://www.aclab-idegui.org)

**Figura 2.29.** Odin Wall, Aclab, 2016. Retirado do site: [www.aclab-idegui.org](http://www.aclab-idegui.org)

**Figura 2.30.** Hexashade, João Carvalho, 2018. Retirado do site: [www.aclab-idegui.org](http://www.aclab-idegui.org)

**Figura 2.31.** Polybrick Wall, Cooper Hewitt Design Museum and Sabin Design Lab, 2016. retirado do site: [www.jennysabin.com](http://www.jennysabin.com)

**Figura 2.32.** Mashrabiya 2.0 uses 3-D printed ceramic disks that cover a pipe to ventilate a building, International Masonry Institute, 2014. Retirado do site: [www.ceramics.org](http://www.ceramics.org)

**Esquema 3.01.** Esquema exponenciando o valor da fibra virgem para a produção da celulose e do papel, tendo em conta as suas fases de transformação.

**Figura 3.01.** Primeira fase, Plantação de viveiros, Ageflor, 2017. Fonte: [www.ageflor.com.br](http://www.ageflor.com.br)

**Figura 3.02.** Segunda fase, Recolha da madeira na floresta, Ageflor, 2017. Retirado do site: [www.ageflor.com.br](http://www.ageflor.com.br)

**Figura 3.03.** Terceira fase, Produção da pasta de papel, Ana Baião, 2013. Retirado do site: [www.expresso.sapo.pt](http://www.expresso.sapo.pt)

**Figura 3.04.** Quarta fase, Produção do papel, The Navigator Company, 2017. Retirado do site: [www.navigator.pt](http://www.navigator.pt)

**Figura 3.05.** Quinta fase, Transformação e expedição, desconhecido, 2018. Retirado do site: [www.dinheirovivo.pt](http://www.dinheirovivo.pt)

**Figura 3.06.** Produto final, The Navigator Company, 2017. Retirado do site: [www.navigator.pt](http://www.navigator.pt)

**Figura 3.07.** Fibras de madeira crua, Exopixel, 2014. Retirada do site: [www.depositphotos.com](http://www.depositphotos.com)

**Figura 3.08.** Pasta acabada de celulose em folha branqueada húmida, antes da secagem e transformação.

**Figura 3.09.** Pasta acabada de celulose em folha branqueada seca, antes da secagem e transformação.

**Figura 3.10.** Pasta acabada de celulose em folha branqueada, após a secagem para transporte.

**Figura 3.11.** Pasta de celulose em pó branqueada, após a secagem.

**Figura 3.12.** Utilização de placas de gesso cartonado, para revestimento de paredes, criação de tetos falsos ou paredes, desconhecido.

Retirado do site: [www.duplafor.com.br](http://www.duplafor.com.br)

**Figura 3.13.** Projeção de fibras de celulose sobre a parede para isolamento térmico e acústico, Epicentro, desconhecido. Retirado do site: [www.grupoepicentro.com](http://www.grupoepicentro.com)

**Figura 3.14.** Utilização de folhas de papel para revestimento de paredes e afins, desconhecido. Retirado do site: [www.bemcolar.com](http://www.bemcolar.com)

**Figura 3.15.** Utilização da celulose para fabricação de caixas e outros artigos, desconhecido.

**Figura 3.16.** Utilização da celulose para geração de armazenamento para alimentos, Elite embalagens, desconhecido.

Retirado do site: [www.eliteembalagens.com.br](http://www.eliteembalagens.com.br)

**Figura 3.17.** Utilização da celulose para fabricação de artigos médicos, desconhecido.

**Figura 3.18.** Utilização da celulose na decoração, artigos para o lar e lazer, desconhecido.

**Figura 4.01.** Impressora 3D Lutum®Mini.

**Figura 4.02.** Impressora 4.0 Lutum®.

**Figura 4.03.** Geração do G-Code em Repetier e Grasshopper.

**Figura 4.04.** Estufa Memmert, utilizada para aceleração da secagem dos modelos.

**Figura 4.05.** Forno Salfor EB160, utilizado para cozimento das peças cerâmicas.

**Figura 4.06.** Possibilidade de conjugação das diferentes misturas calculadas.

**Figura 4.07.** Demonstração do material em estudo, o Amido.

**Figura 4.08.** Demonstração do material em estudo, o Ágar-Ágar.

**Figura 4.09.** Demonstração do material em estudo, o Serrim.

**Figura 4.10.** Pesagem de 350gr de água (quente ou fria).

**Figura 4.11.** Colocação de 50gr de amido à água previamente pesada.

**Figura 4.12.** Mistura dos dois componentes após pesagem e posterior aquecimento.

**Figura 4.13.** Transformação da mistura, passagem do estado líquido a gelatinoso.

**Figura 4.14.** Colocação de amido após a transformação da mistura, impossibilidade de mistura entre amido seco e amido transformado.

**Figura 4.15.** Demonstração do material em estudo, o Amido.

**Figura 4.16.** Pasta acabada de celulose em folha branqueada.

**Figura 4.17.** Pesagem de 350gr de celulose em folha transformada.

**Figura 4.18.** Pesagem de 150gr de amido fervido.

**Figura 4.19.** Homogeneização da mistura A, celulose em folha transformada e amido fervido.

**Figura 4.20.** Modelos para estudo da limitação para curvatura da mistura, desenho vetorial. (1) cilindro, (2) cone truncado com 20° de curvatura, (3) cone truncado com 25° de curvatura, (4) cone truncado com 30° de curvatura, (5) cone truncado com 35° de curvatura, (6) cone truncado com 40° de curvatura, (7) cone truncado com 45° de curvatura e por fim, (8) cone truncado com 50° de curvatura.

**Figura 4.21.** Esquema demonstrativo da inclinação mínima pretendida para a fabricação das peças, nomeadamente para as misturas à base de celulose em folha transformada, mistura A. Cone truncado com 30° de curvatura máxima, esquema 4, Figura 4.20.

**Figura 4.22.** Impressão do primeiro teste realizado para comprovação da mistura A.

**Figura 4.23.** Secagem dos objetos produzidos com a mistura A

**Figura 4.24.** Observação da textura após a secagem do primeiro teste realizado.

**Figura 4.25.** Acabamento dos círculos produzidos para a geração do primeiro teste de estudo.

**Figura 4.26.** Acabamento dos círculos produzidos para a geração do primeiro teste de estudo. Variação da textura, granulometria, dependendo do bico de extrusão utilizado.

**Figura 4.27.** Acabamento do conjunto de modelos com diversas inclinações, testar a limitação da curvatura da mistura.

**Figura 4.28.** Demonstração do material em estudo, o Amido.

**Figura 4.29.** Pasta de celulose em pó branqueada.

**Figura 4.30.** Pesagem de 60gr de celulose em pó.

**Figura 4.31.** Pesagem de 300gr de amido fervido.

**Figura 4.32.** Homogeneização da mistura B, celulose em pó e amido fervido.

**Figura 4.33.** Modelos para estudo da limitação para curvatura da mistura, desenho vetorial. (1) cilindro, (2) cone truncado com 20° de curvatura, (3) cone truncado com 25° de curvatura, (4) cone truncado com 30° de

curvatura, (5) cone truncado com 35° de curvatura, (6) cone truncado com 40° de curvatura, (7) cone truncado com 45° de curvatura e por fim, (8) cone truncado com 50° de curvatura.

**Figura 4.34.** Esquema demonstrativo da inclinação mínima pretendida para a fabricação das peças, nomeadamente para as misturas à base de celulose em pó, mistura B. Cone truncado com 40° de curvatura máxima, esquema 8, Figura 4.33.

**Figura 4.35.** Peças AM Aalto, desenho vetorial.

**Figura 4.36.** Alveolus Block, desenho vetorial.

**Figura 4.37.** Primeiro teste de impressão, cilindro e dois cones truncados. Observação do comportamento da mistura B.

**Figura 4.38.** Segundo teste de impressão, estudo da limitação da curvatura máxima permitida pela mistura B.

**Figura 4.39.** Impressão das peças AM Aalto. Peça fabricada com parede simples e bico de extrusão de 3mm.

**Figura 4.40.** Fabricação do bloco Alveolus, com a mistura B. Impressão por módulos, originando paredes simples exteriores e paredes duplas interiores.

**Figura 4.41.** Fabricação das paredes do bloco Alveolus. Impressão cuidada e limpa.

**Figura 4.42.** Extrusão de material da mistura B, para estudo da retração, delimitação de um comprimento no ato de impressão para observação da posterior retração dada a secagem.

**Figura 4.43.** Divisão do bloco Alveolus em múltiplos módulos para impressão. Esquema superior diz respeito ao objeto final, esquema inferior diz respeito à sua preparação para impressão.

**Figura 4.44.** Secagem do modelo de estudo impresso AM Aalto, retração do material, camada a camada. Variação do bico de extrusão e paredes. Peça superior, parede simples com bico de extrusão de 10mm, peça central, parede simples com bico de extrusão de 3mm, peça inferior, parede dupla com bico de extrusão de 3mm.

**Figura 4.45.** Secagem do modelo de estudo fabricado, o bloco Alveolus, secagem em estufa.

**Figura 4.46.** Laminação do modelo de estudo Alveolus após secagem em estufa. Observação da retração das diferentes camadas, intensificação da laminação nas paredes simples. Deformação com maior visibilidade nas paredes simples, deformação com menor visibilidade nas paredes duplas.

**Figura 4.47.** Acabamento final das taças para o estudo da limitação de curvatura da mistura B.

**Figura 4.48.** Acabamento final das peças AM Aalto. Variação do bico de extrusão e paredes. Peça superior, parede simples com bico de extrusão de 10mm, peça central, parede simples com bico de extrusão de 3mm, peça inferior, parede dupla com bico de extrusão de 3mm

**Figura 4.49.** Acabamento final do bloco Alveolus. Observação da retração das diferentes camadas.

**Figura 4.50.** Demonstração do material em estudo, o Amido.

**Figura 4.51.** Pasta de celulose em pó branqueada.

**Figura 4.52.** Demonstração do material em estudo, o Serrim.

**Figura 4.53.** Manipulação da mistura B, 60gr de celulose e 350gr de amido.

**Figura 4.54.** Pesagem de 30gr de fibras de madeira.

**Figura 4.55.** Agregação de ambos os materiais em estudo. Obtenção de uma mistura homogénea e compósita.

**Figura 4.56.** Primeira fase de trabalho, provetes produzidos com a mistura B. (1) cilindro, (2) cone truncado com 20° de curvatura, (3) cone truncado com 25° de curvatura, (4) cone truncado com 30° de curvatura, (5) cone truncado com 35° de curvatura, (6) cone truncado com 40° de curvatura, (7) cone truncado com 45° de curvatura e por fim, (8) cone truncado com 50° de curvatura.

**Figura 4.57.** Esquema demonstrativo da inclinação mínima pretendida para a fabricação das peças, nomeadamente para as misturas à base de celulose em pó, mistura B.1. Cone truncado com 40° de curvatura máxima, esquema 8, Figura 4.56.

**Figura 4.58.** Impressão dos provetes para estudo da limitação de curvatura da mistura B.1. Mistura B.1 com 30gr de fibras de madeira.

**Figura 4.59.** Secagem das peças AM Aalto, em estufa, com temperaturas superiores a 40°C. Retração e deformação das peças pouco observada.

**Figura 4.60.** Secagem do bloco Alveolus, em estufa, com temperaturas superiores a 40°C. Observação da deformação e laminação das camadas.

**Figura 4.61.** Acabamento final observado após secagem das taças, para estudo da limitação de curvatura máxima suportada pela mistura B.1. Esta peça apresenta cerca de 30gr de fibras de madeira.

**Figura 4.62.** Acabamento final das peças AM Aalto. Peça superior com cerca de 15gr de fibras de madeira, peça central com 45gr de fibras de madeira e por fim, peça inferior com 30gr de fibras de madeira. Observação da textura, cor do material e suas retrações e deformações.

**Figura 4.63.** Acabamento final do bloco Alveolus, com cerca de 30gr de fibras de madeira. Observação da textura, cor do material e suas retrações e deformações.

**Figura 4.64.** Fabricação de pequenos círculos com a mistura A, observação do acabamento robusto e tonalidade branqueada.

**Figura 4.65.** Fabricação dos blocos Alveolus com a mistura B e B.1. Observação do acabamento final e tonalidade de ambas as peças, laminação e destacamento sem fibras de madeira e com fibras de madeira.

**Figura 4.66.** Aspeto final da mistura com mais potencialidades para fabricação de elementos arquitetónicos, tirando partido das técnicas de fabrico aditivo.

**Figura 4.67.** Problemas verificados com a pasta de argila sem celulose. Primeiro esquema, deformações após secagem, segundo, retração do material, terceiro, fissuração entre conexões, por fim, quarto, peso dos



modelos fabricados.

**Figura 4.68.** Demonstração do material em estudo, a Argila.

**Figura 4.69.** Pasta acabada de celulose em folha branqueada.

**Figura 4.70.** Pasta de celulose em pó branqueada.

**Figura 4.71.** Demonstração do material em estudo, a argila.

**Figura 4.72.** Pasta acabada de celulose em folha branqueada.

**Figura 4.73.** Pesagem de 1000gr de pasta cerâmica e anexação da água em falta para obtenção do teor de humidade pretendido.

**Figura 4.74.** Pesagem da percentagem da pasta de celulose em folha transformada necessária.

**Figura 4.75.** Agregação de ambos os materiais e obtenção da mistura C.

**Figura 4.76.** Primeira fase de trabalho, provetes produzidos com a mistura 1. (1) cilindro, (2) cone truncado com 20° de curvatura, (3) cone truncado com 25° de curvatura, (4) cone truncado com 30° de curvatura, (5) cone truncado com 35° de curvatura, (6) cone truncado com 40° de curvatura, (7) cone truncado com 45° de curvatura e por fim, (8) cone truncado com 50° de curvatura.

**Figura 4.77.** Primeira fase de trabalho, provetes produzidos com a mistura 2. (1) cilindro, (2) cone truncado com 20° de curvatura, (3) cone truncado com 25° de curvatura, (4) cone truncado com 30° de curvatura, (5) cone truncado com 35° de curvatura, (6) cone truncado com 40° de curvatura, (7) cone truncado com 45° de curvatura e por fim, (8) cone truncado com 50° de curvatura.

**Figura 4.78.** Fabricação dos cones truncados, para estudo da deformação e inclinação das diferentes misturas criadas com celulose. Impressão com a mistura 3.

**Figura 4.79.** Produção da peça AM Aalto, parede dupla e bico de extrusão de 0,3mm, com a mistura 3. Entupimento do bico de extrusão com grãos de celulose transformados, originando defeitos no modelo. Modelo impresso com metade da altura inicialmente proposta.

**Figura 4.80.** Impressão de um modelo de estudo com mistura de argila e pasta de celulose em folha, preparada no dia anterior. Observação do comportamento da celulose quando anexada à argila.

**Figura 4.81.** Secagem do cone truncado com 70° de curvatura. Fabricação do modelo com a mistura de pasta cerâmica, argila do tipo GRÉS 130 MP, sem celulose.

**Figura 4.82.** Secagem do cone truncado com 70° de curvatura. Fabricação do modelo com a mistura de pasta cerâmica, argila do tipo GRÉS 130 MP e 25gr de pasta de celulose em folha transformada, mistura 1.

**Figura 4.83.** Secagem do cone truncado com 70° de curvatura. Fabricação do modelo com a mistura de pasta cerâmica, argila do tipo GRÉS 130 MP e 50gr de pasta de celulose em folha transformada, mistura 2.

**Figura 4.84.** Secagem do cone truncado com 70° de curvatura. Fabricação do modelo com a mistura de pasta cerâmica, argila do tipo GRÉS 130 MP e 75gr de pasta de celulose em folha transformada, mistura 3.

**Figura 4.85.** Secagem do cone truncado com 70° de curvatura.

Fabricação do modelo com a mistura de pasta cerâmica, argila do tipo GRÉS 130 MP e 100gr de pasta de celulose em folha transformada, mistura 4.

**Figura 4.86.** Secagem do Modelo AM Aalto, em estufa, produzido com a mistura de pasta cerâmica, argila do tipo GRÉS 130 MP e 25gr de pasta de celulose em folha transformada, mistura 1.

**Figura 4.87.** Secagem do cone truncado com 70° de curvatura. Fabricação do modelo com a mistura de pasta cerâmica, argila do tipo GRÉS 130 MP e 75gr de pasta de celulose em folha transformada, mistura 3.

**Figura 4.88.** Secagem do cone truncado com 70° de curvatura. Fabricação do modelo com a mistura de pasta cerâmica, argila do tipo GRÉS 130 MP e 100gr de pasta de celulose em folha transformada, mistura 4.

**Figura 4.89.** Secagem do Modelo AM Aalto, em estufa, produzido com a mistura de pasta cerâmica, argila do tipo GRÉS 130 MP e 25gr de pasta de celulose em folha transformada, mistura 1.

**Figura 4.90.** Acabamento final das taças truncadas, com as múltiplas misturas de estudo.

**Figura 4.91.** Acabamento final das peças produzidas com a mistura de pasta cerâmica e pasta de celulose em folha transformada.

**Figura 4.92.** Acabamento final das peças produzidas, a peça superior foi fabricada com a mistura de pasta cerâmica e sem pasta de celulose em folha transformada, a peça central com mistura de pasta cerâmica e 25gr pasta de celulose em folha transformada, mistura 1, por último a peça inferior com mistura de pasta cerâmica e 75gr pasta de celulose em folha transformada, mistura 3.

**Figura 4.93.** Demonstração do material em estudo, a argila.

**Figura 4.94.** Pasta acabada de celulose em folha branqueada.

**Figura 4.95.** Pesagem de 1000gr de pasta cerâmica e anexação da água em falta para obtenção do teor de humidade pretendido.

**Figura 4.96.** Pesagem da percentagem da pasta de celulose em pó necessária.

**Figura 4.97.** Agregação de ambos os materiais e obtenção da mistura D.

**Figura 4.98.** Primeira fase de trabalho, provetes produzidos com a mistura 1. (1) cilindro, (2) cone truncado com 20° de curvatura, (3) cone truncado com 25° de curvatura, (4) cone truncado com 30° de curvatura, (5) cone truncado com 35° de curvatura, (6) cone truncado com 40° de curvatura, (7) cone truncado com 45° de curvatura e por fim, (8) cone truncado com 50° de curvatura.

**Figura 4.99.** Primeira fase de trabalho, provetes produzidos com a mistura 4. (1) cilindro, (2) cone truncado com 20° de curvatura, (3) cone truncado com 25° de curvatura, (4) cone truncado com 30° de curvatura, (5) cone truncado com 35° de curvatura, (6) cone truncado com 40° de curvatura, (7) cone truncado com 45° de curvatura e por fim, (8) cone truncado com 50° de curvatura.

**Figura 4.100.** Fabricação dos provetes, cones truncados, para estudo da limitação de curvatura da mistura D. Impressão com a mistura de pasta

cerâmica e 5% de celulose em pó, mistura 3.

**Figura 4.101.** Fabricação do bloco Alveolus. Impressão a mistura de pasta cerâmica e 2,5% de celulose em pó, mistura 2.

**Figura 4.102.** Fabricação do bloco Alveolus. Consequências de impressão pelo armazenamento da mistura de pasta cerâmica e celulose em pó. Observação das crateras.

**Figura 4.103.** Secagem do cone truncado com 70° de curvatura. Fabricação do modelo com a mistura de pasta cerâmica sem celulose.

**Figura 4.104.** Secagem do cone truncado com 70° de curvatura. Fabricação do modelo com a mistura de pasta cerâmica e 1% de pasta de celulose em pó, mistura 1.

**Figura 4.105.** Secagem do cone truncado com 70° de curvatura. Fabricação do modelo com a mistura de pasta cerâmica e 2,5% de pasta de celulose em pó, mistura 2.

**Figura 4.106.** Secagem do cone truncado com 70° de curvatura. Fabricação do modelo com a mistura de pasta cerâmica, argila do tipo GRÉS 130 MP e 5% de pasta de celulose em pó, mistura 3.

**Figura 4.107.** Secagem do cone truncado com 70° de curvatura. Fabricação do modelo com a mistura de pasta cerâmica, argila do tipo GRÉS 130 MP e 7,5% de pasta de celulose em pó, mistura 4.

**Figura 4.108.** Secagem do bloco Alveolus. Esto da retração da peça com pasta cerâmica e pasta de celulose em pó.

**Figura 4.109.** Bloco Alveolus produzido com pasta de argila sem celulose. Visualização de deformações e fissurações. Aspetto mais cuidado.

**Figura 4.110.** Bloco Alveolus produzido com pasta de argila e celulose em pó. Visualização de deformações geradas pela impressão. Aspetto menos cuidado.

**Figura 4.111.** Secagem do bloco Alveolus. Peça deitada cozida, com uma mistura de pasta cerâmica sem celulose, peça levantada seca, com uma mistura de pasta cerâmica e celulose.

**Figura 4.112.** Peça impressa com argila e pasta de celulose em folha. Observação dos diferentes grãos de celulose presentes na mistura.

**Figura 4.113.** Peça impressa com argila e pasta de celulose e pó. Impressão mais limpa e cuidada. Indistinção dos grãos em pó de celulose presentes na mistura.

**Figura 4.114.** Acabamento, após cozedura, da mistura C. Observação dos grãos de celulose comparados a pequenos grãos de areia.

**Figura 5.01.** Protótipo de uma parede, amostra do estudo de caso. a.Axonometria exemplificativo da amostra escolhida para prototipagem. b.Plano frontal da amostra escolhida para prototipagem.

**Figura 5.02.** Kusudama, Origami Japonês, com caráter geométrico e 30 módulos piramidais triangulares, Maria Sinayskaya, 2010. Retirado do site: [www.goorigami.com](http://www.goorigami.com)

**Figura 5.03.** Kusudama, Origami Japonês, com caráter geométrico e 30 módulos piramidais pentagonais, Ekaterina Lukasheva, 2014. Retirado do site: [www.flickr.com](http://www.flickr.com)

**Figura 5.04.** Desenvolvimento das peças a partir de três formas geométricas regulares. a.geração da forma hexagonal exterior, b.geração da forma triangular e pentagonal interior, c.geração do bloco tendo em conta as geometrias e d.axonometria do bloco definido.

**Figura 5.05.** Interface gráfico do ambiente de trabalho do Rhinoceros (esquerda) com Grasshopper (direita), onde se ilustra a geração de um conjunto de blocos hexagonais (em Rhinoceros) e uma parte do respetivo modelo computacional (em Grasshopper).

**Figura 5.06.** Inserção dos polígonos, triângulo e pentágono, dentro da geometria base de estudo o hexágono. a.Definição do centróide do hexágono, b.Inserção de uma circunferência no interior, c.Definição do raio desde o centróide até aos pontos médios das laterais do hexágono e d.Colocação dos polígonos no interior da circunferência com raio igual à distância entre o centróide e os pontos médios das laterais do hexágonos.

**Figura 5.07.** Código grasshopper, Desenvolvimento da malha hexagonal e suas variações e Geração das paredes hexagonais. Código gerado para as misturas à base de celulose.

**Figura 5.08.** Geração da malha hexagonal e as suas variações. a.Definição da malha exterior hexagonal, b.Colocação de três pontos aleatórios na malha hexagonal, c.Definição da malha interior triangular, sem variações, d.Introdução das variações de escala da malha interior triangular, tendo em conta a colocação dos três pontos aleatórios definidos anteriormente, e. Definição da malha interior pentagonal, sem variações e f.Extrusão das paredes exteriores hexagonais.

**Figura 5.09.** Geração das superfícies exteriores. a.Definição da malha hexagonal e triangular. b.Variação da dimensão da malha triangular. c.Movimentação da malha triangular para o plano de base da peça. d.Geração da superfície interior. e. Distância entre superfícies. f.Geração da superfície exterior.

**Figura 5.10.** Código grasshopper, Desenvolvimento das pirâmides truncadas inferiores. Código gerado para as misturas à base de celulose.

**Figura 5.11.** Geração das pirâmides truncadas inferiores. g.Introdução de uma condicional para eliminação de metade dos elementos que definem a malha triangular. h. Geração das duas superfícies das pirâmides truncadas inferiores. i. Geração do bloco das pirâmides truncadas inferiores sem inclusão de estrutura interna.

**Figura 5.12.** Geração das paredes internas. j.Seleção das arestas da superfície anteriormente gerada. k.Projeção das arestas para o plano base. l.Extrusão das paredes. m.Geração das paredes internas secundárias de apoio às desenhadas. n.Extrusão das paredes internas secundárias. o.Geração do Bloco.

**Figura 5.13.** Código grasshopper, Desenvolvimento das paredes internas das pirâmides truncadas inferiores. Código gerado para as misturas à base de celulose.

**Figura 5.14.** Geração das paredes internas. p.Geração das paredes internas principais através da projeção das arestas da superfície no plano de base. q. Geração das paredes internas secundárias através da união

entre os pontos médios. r.Finalização das pirâmides truncadas inferiores.

**Figura 5.15.** Código grasshopper, Rotação das pirâmides truncadas inferiores segundo um padrão. Código gerado para as misturas à base de celulose.

**Figura 5.16.** Rotação das pirâmides truncadas inferiores. s.Estudos das possíveis rotações, determinação da posição 1 e 2 segundo uma rotação de 60°. t.Axonometria exemplificativa da rotação presente nas peças segundo um ângulo de 60°. u.Composição do protótipo de estudo, observação das rotações mencionadas, posição 1 e 2, segundo uma condicional - padrão True e False.

**Figura 5.17.** Geração das superfícies. a.Definição da malha hexagonal e pentagonal. b.Variação da dimensão da malha. c.Movimentação da malha pentagonal. d.Geração da superfície interior. e. Distância entre superfícies. f.Geração da superfície exterior.

**Figura 5.18.** Código grasshopper, Desenvolvimento das pirâmides truncadas superiores. Código gerado para as misturas à base de celulose.

**Figura 5.19.** Geração das pirâmides truncadas superiores. g.Introdução de uma condicional para eliminação de metade dos elementos que definem a malha pentagonal. h. Geração das duas superfícies das pirâmides truncadas superiores. i. Geração do bloco das pirâmides truncadas superiores sem inclusão de estrutura interna.

**Figura 5.20.** Geração das paredes internas. j.Seleção das arestas da base superior. k.Projeção das arestas da base superior e seleção das arestas da superfície gerada anteriormente. l.Extrusão da projeção da base superior. m.Desenvolvimento das paredes internas. n.Extrusão das paredes internas e posterior corte com a superfície. o.Geração do Bloco.

**Figura 5.21.** Código grasshopper, Desenvolvimento das paredes internas das pirâmides truncadas superiores. Código gerado para as misturas à base de celulose.

**Figura 5.22.** Geração das paredes internas. p.Geração das paredes internas principais. q. Geração das paredes internas secundárias através da união entre os pontos médios. r.Finalização das pirâmides truncadas superiores.

**Figura 5.23.** Código grasshopper, Rotação das pirâmides truncadas superiores segundo um padrão. Código gerado para as misturas à base de celulose.

**Figura 5.24.** Rotação das pirâmides truncadas superiores. s.Estudos das possíveis rotações, determinação da posição 1 a 4 segundo uma rotação de 60°. t.Axonometria exemplificativa da rotação presente nas peças segundo um ângulo de 60°. u.Composição do protótipo de estudo, observação das rotações mencionadas, posição 1 a 4, segundo uma condicional - padrão True e False.

**Figura 5.25.** Finalização do modelo computacional, protótipo de parede - caso de estudo. v.Plano de frente do modelo. x.Axonometria ilustrativa do modelo.

**Figura 5.26.** Interface gráfico do ambiente de trabalho do Rhinoceros (esquerda) com Grasshopper (direita), com a introdução das geometrias

no código de impressão em Grasshopper.

**Figura 5.27.** Interface gráfico do ambiente de trabalho do Rhinoceros (esquerda) com Grasshopper (direita), com a introdução das geometrias que definem a peça, no código de impressão para geração do G-Code.

**Figura 5.28.** Interface gráfico do ambiente de trabalho do Repetier (esquerda) com Grasshopper (direita) utilizando um plug-in, com a geração do G-Code.

**Figura 5.29.** Gráfico demonstrativo da inclinação mínima possível para a fabricação de peça ou bloco com misturas à base de pastas de celulose em pó e argila com pasta de celulose em pó. Todas as peças produzidas devem apresentar inclinações iguais ou superiores a 40°.

**Figura 5.30.** Inclinação mínima verificada nas peças inferiores e superiores. (a) Peça inferior com inclinação mínima de 40°, (b) Peça inferior com inclinação mínima de 46° e Peça superior com inclinação mínima de 53°.

**Figura 5.31.** Observação das paredes duplas a preto e verde e paredes simples a vermelho. Caminho percorrido durante a impressão das peças, primeiro linhas a verde, segundo linhas a vermelho e terceiro linhas a preto.

**Figura 5.32.** Impressão com a mistura B.1, do caso de estudo.

**Figura 5.33.** Escolha do tramo de parede a ser prototipado do caso de estudo.

**Figura 5.34.** (a) Amostra ampliada escolhida para fabricação. As peças de A.1 a A.9, serão produzidas com a mistura D, as peças de B.1 a B.10 serão produzidas com a mistura B.1 e as peças de C.1 a C.9 serão produzidas com a mistura B. (b) Axonometria representativa da amostra ampliada escolhida para fabricação.

**Figura 5.35.** Retração da peça produzida com celulose.

**Figura 5.36.** Retração da peça produzida em argila. Peça à esquerda encontra-se seca, peça à direita encontra-se cozida.

**Figura 5.37.** Acabamento final da peça em argila, com observação das fibras de celulose.

**Figura 5.38.** Estudo de retração das peças, primeiro teste de impressão.

**Figura 5.39.** Estudo de retração das peças, segundo teste de impressão.

**Figura 5.40.** Retração da peça fabricada com a mistura B, na impressão e após secagem, no comprimento.

**Figura 5.41.** Retração da peça fabricada com a mistura B, na impressão e após secagem, na altura.

**Figura 5.42.** Retração da peça fabricada com a mistura D, na impressão e após secagem, no comprimento.

**Figura 5.43.** Retração da peça fabricada com a mistura D, na impressão e após secagem, na altura.

**Figura 5.44.** Fases de estudo para eliminação da deformação das peças, (1) paredes internas fase inicial, (2) paredes internas para primeira correção, (3) paredes internas para segunda correção e fase final.

**Figura 5.45.** Deformação das peças ao longo das suas fases de

execução, a 'bola' laranja paredes deformadas, a 'bola' verde paredes não deformadas.

**Figura 5.46.** Deformação das peças durante a fase inicial de trabalho.

**Figura 5.47.** Deformação das peças aquando a colocação da estrutura interna.

**Figura 5.48.** Eliminação da deformação verificada anteriormente pela indexação das paredes internas.

**Figura 5.49.** Acabamento das peças em celulose, após a secagem.

**Figura 5.50.** Acabamento das peças em argila, após a secagem.

**Figura 5.51.** Conjugação das diferentes texturas, cores e materias no estudo de caso.

**Figura 5.52.** Desenvolvimento dos encaixes, (1) ligação 'macho-fêmea', (2) ligação com duas fêmeas e sem macho'.

**Figura 5.53.** Desenvolvimento do encaixe exterior ao bloco.

**Figura 5.54.** Desenvolvimento do encaixe exterior ao bloco.

**Figura 5.55.** Esquema de montagem do encaixe através da colocação de um parafuso externo.

**Figura 5.54.** Esquema após a montagem, com a inclusão de um parafuso e atravessamento da placa de MDF.

**Figura 5.56.** Impressão da peça de ligação em FFF.

**Figura 5.57.** Peça de ligação fabricada em FFF.

**Figura 5.58.** Ligação entre os diferentes blocos constituintes da parede.

**Figura 5.59.** Amostra do protótipo desenvolvido com designação das peças produzidas. a.Mistura B. b.Mistura B.1. c.Mistura D.

**Figura 5.60.** Demonstração de montagem do sistema de suporte criado para a sustentação da parede.

**Figura 5.61.** Sistema de suporte montado e finalizado.

**Figura 5.62.** Fabricação das peças pertencentes à amostra de estudo selecionada.

**Figura 5.63.** Secagem em estufa das peças produzidas.

**Figura 5.64.** Produção do sistema de suporte da amostra de estudo, corte das placas de MDF preto recorrendo à CNC.

**Figura 5.65.** Observação das placas pertencentes ao sistema de suporte. Secagem do óleo aplicado.

**Figura 5.66.** Colocação dos encaixes, fixação com parafusos roscados.

**Figura 5.67.** Produto final, observação da textura e tonalidade produzida pelas diferentes misturas em estudo — Mistura B; B.1 e D. Visualização das variações introduzidas no modelo produzido.

**Figura 5.68.** Produto final, observação da textura produzida pelas diferentes misturas em estudo — Mistura B; B.1 e D.

**Figura 5.69.** Produto final, observação das peças produzidas com a mistura B e B.1. — Misturas à base de celulose e amido.

**Figura 5.70.** Peças finais, observação das peças inferiores — com abertura triangular — e peças superiores — com abertura pentagonal.

Diferenciação da textura e tonalidade das peças.

**Figura 5.71.** Peça final, observação da peça inferior — com abertura triangular — produzida com a mistura B.

**Figura 5.72.** Peça final, observação da peça inferior — com abertura pentagonal — produzida com a mistura B.1.

**Figura 5.73.** Peça final, observação da peça inferior — com abertura triangular — produzida com a mistura D.

**Figura 5.71.** Peça final, observação da peça inferior — com abertura triangular — produzida com a mistura B.

**Figura 5.72.** Peça final, observação da peça inferior — com abertura pentagonal — produzida com a mistura B.1.

**Figura 5.73.** Peça final, observação da peça inferior — com abertura triangular — produzida com a mistura D.



# Índice de tabelas

**Tabela 4.01.** Propriedades inerentes à mistura A, aquando a sua utilização e após secagem dos objetos produzidos.

**Tabela 4.02.** Propriedades inerentes à mistura B, aquando a sua utilização e após secagem dos objetos produzidos.

**Tabela 4.03.** Propriedades inerentes à mistura B.1, aquando a sua utilização e após secagem dos objetos produzidos.

**Tabela 4.04.** Demonstração das propriedades da pasta cerâmica ou argila GRÉS130, com comparação entre o comportamento em cru e após secagem. A informação apresentada é uma compilação da ficha técnica do material.

**Tabela 4.05.** Demonstração das propriedades da pasta cerâmica, argila do tipo GRÉS 130 e pasta de celulose em folha transformada húmida, com comparação entre o comportamento em cru e após secagem.

**Tabela 4.06.** Demonstração das propriedades da pasta cerâmica, argila do tipo GRÉS 130 e pasta de celulose em folha transformada húmida, com comparação entre o comportamento em cru e após secagem.

**Tabela 4.07.** Demonstração das misturas idealizadas e possíveis índices de retração das taças truncadas para estudo da limitação da curvatura.

**Tabela 4.08.** Demonstração das propriedades da pasta cerâmica, argila do tipo GRÉS 130 e pasta de celulose em folha transformada húmida, com comparação entre o comportamento em cru e após secagem.

**Tabela 4.09.** Demonstração das propriedades da pasta cerâmica e pasta de celulose em pó, com comparação entre o comportamento em cru e após secagem.

**Tabela 4.10.** Demonstração das propriedades da pasta cerâmica e pasta de celulose em pó, com comparação entre o comportamento em cru e após secagem.

**Tabela 4.11.** Demonstração das misturas idealizadas e possíveis índices de retração das taças truncadas para estudo da limitação da curvatura.

**Tabela 4.12.** Demonstração do comportamento dos blocos Alveolus quando fabricados com misturas sem e com celulose, observando a sua dimensão inicial e final, o índice de retração e posterior peso dado o estado de secagem da peça.

**Tabela 5.01.** Representação das dimensões inicialmente propostas para a fabricação das peças, as dimensões obtidas após a secagem e o índice

de retração tendo em conta os dois fatores enunciados.

**Tabela 5.02.** Representação das dimensões estratégicas de compensação para produção de peças com dimensões iguais, tendo em conta os dois momentos de estudo.

# Lista de siglas

- ACLAB.** *Advanced Ceramic Laboratory*
- AM.** *Additive Manufacturing* (fabrico aditivo)
- API.** *Application Programming Interface*
- BJ.** *Binder Jetting*
- CAD.** *Computer Aided Design* (desenho assistido por computador)
- FA.** *Fabrico Aditivo*
- FFF.** *Fused Filament Fabrication*
- FDM.** *Fused Deposition Modelling*
- FTDig.** *Formas e Técnicas do digital*
- GH.** *Grasshopper*
- IDEGUI.** *Instituto de Design de Guimarães*
- LOM.** *Laminated Object Manufacturing*
- MIT.** *Massachusetts Institute of Technology*
- MITS.** *Micro Instrumentation and Telemetry Systems*
- MFC.** *Exilva MicroFibrillated cellulose*
- PLA.** *Polylactic Acid* (ácido polilático)
- SDL.** *Selective Deposition Lamination*
- SLA.** *Stereolithography* (estereolitografia)
- SLS.** *Selective Laser Sintering*



# 1. Introdução

*“3D printing’ is the colloquial term for a group of technologies known as additive manufacturing. In order to print a three-dimensional solid object, a 3D printer reads the shape from a digital 3D model file before laying down and bonding successive layers of material. Each layer contains a cross section of the final object, which is formed by stacking these layers on top of each other” (Warnier et al. 2014).*

O fabrico aditivo (FA) é uma técnica de produção que difere dos processos de fabricação tradicionais ancestrais, algumas destas técnicas ainda se encontram presentes na produção de elementos arquitetónicos. Nos últimos 40 anos, um número significativo de tecnologias de protótipagem rápida como o FA, foram desenvolvidas com o mesmo propósito fabricar coisas (Warnier et al. 2014). Estas técnicas tem permitido aumentar o campo de possibilidades para a geração de formas mais complexas e expandir a área de trabalho. Esta área de investigação tem atraído o interesse de investigadores, arquitetos, designers, engenheiros e construtores, com o objetivo de aumentar a versatilidade dos produtos produzidos, explorar o mercado integrando modelos, peças e objetos fabricados com os mais dispares materiais. O termo ‘impressão 3D’ em certa medida é uma simplificação do processo de FA, que cada vez mais alcança popularidade pelo conjunto de opções e maior acessibilidade para um utilizador não especializado.

O presente capítulo tem por finalidade expor o tema escolhido para o desenvolvimento desta investigação científica, abordando as temáticas que o englobam e as problemáticas presentes, com o recurso às técnicas de prototipagem rápida e ao uso de materiais inovadores, demonstrando quais os objetivos definidos para o desenvolvimento deste trabalho. A conjugação da impressão 3D, materiais compósitos e inovadores permite aumentar o conhecimento na área da construção e tecnologia.



## 1.1. Tema e problemática

A presente tese desenvolve uma investigação que visa o cruzamento entre duas áreas do conhecimento dispares: as tecnologias digitais enquanto ferramentas auxiliares ao desenvolvimento do projeto e sua construção e a celulose enquanto matéria-prima. Na última década verifica-se uma crescente integração de processos de fabrico e prototipagem rápida de elementos construtivos para a produção rápida e econômica de modelos, protótipos e elementos de construção complexos, individuais e duráveis (Hauschild e Karzel, 2018), podendo ser aplicados para a produção em massa, ou para fins individualizados e específicos. Esta investigação centra-se na possibilidade de criação de uma pasta à base de celulose, para aplicação no fabrico aditivo de elementos arquitetónicos. Tratando-se de uma matéria-prima biodegradável, ecológica, reutilizável e economicamente acessível o presente trabalho propõe investigar metodologias e processo de convergência entre estas duas áreas. Em simultâneo é pertinente e atual o desenvolvimento de estudos em que se utilizam materiais ecológicos ou recicláveis e processos de fabrico aditivo.

Atualmente, com a disseminação de técnicas de modelação computacional, para implementação de regras de desenho paramétrico, apoiadas em aplicações como o Grasshopper<sup>1</sup>, abrem inúmeras áreas de estudo (Hauschild e Karzel, 2018). Nesta investigação para observação do comportamento entre as diferentes misturas idealizadas, desenvolveu-se um protótipo de uma parede gerado através do Grasshopper e posteriormente fabricado utilizando técnicas de FA.

Remonta à antiguidade o recurso à adição de água e pós (materiais cerâmicos) para a geração de uma pasta de modelação ou união de tijolos, utilizados na construção de edifícios de pequena e grande dimensões. No contexto desta investigação pretende-se contribuir para a utilização da celulose como ponto de partida para criação de novas construções sustentáveis, leves e biodegradáveis.

1. O Grasshopper é um programa de algoritmos gráficos integrados nas ferramentas de modelação 3D, desenvolvido por David Rutten e Robert McNeel, este funciona dentro do Rhinoceros. Diferente do RhinoScript, o Grasshopper não requer qualquer conhecimento de programação ou scripting. A sua utilização é bastante simples através do arraste dos componentes para uma área de trabalho, esses componentes são constituídos por conexões, onde as saídas de uns se ligam às entradas de outros. (Retirado do site: [www.grasshopper3d.com](http://www.grasshopper3d.com))





## 1.2. Objetivos e considerações gerais

Tendo em consideração o avanço do FA em Arquitetura, a exploração de materiais compósitos, inovadores e biodegradáveis, é um tema ainda pouco desenvolvido. Esta investigação centra-se na manipulação de uma ou várias misturas à base de celulose, um material versátil e abundante na natureza, para a geração de elementos arquitetónicos, sejam eles de carácter temporário ou permanente.

Este trabalho parte do pressuposto que a celulose é um material com baixo custo económico e reciclável. A conjugação de outros materiais com a celulose pretende identificar quais aquelas que se agregam e respondem da melhor forma.

A geração de um protótipo, recorrendo ao uso de ferramentas computacionais para manipulação tridimensional, pretende demonstrar os resultados obtidos no estudo individual de cada mistura. A fabricação do protótipo é uma forma de agregar todas as misturas criando uma base de comparação entre elas, pela observação das texturas, pesos, resistência, retrações e deformações. Todas as misturas centram-se sempre na trabalhabilidade e aplicabilidade no FA tendo como base de estudo a presença da celulose. Esta pode gerar novas misturas mas também funcionar como material aditivo, aumentando a trabalhabilidade de determinadas misturas, no caso específico a pasta de cerâmica.



## 1.3. Organização da tese

O documento divide-se ao longo de oito capítulos, nos quais se inclui este capítulo inicial (*1.Introdução*). O capítulo introdutório, remete para a temática em estudo (*1.1.Tema e problemática*) e quais os objetivos e considerações gerais traçados para o seu desenvolvimento (*1.2.Objetivos e considerações gerais*). Também pretende divulgar qual a metodologia de trabalho adotada para a concretização desta investigação científica (*1.4.Metodologia de trabalho*).

O capítulo dois (*2.Enquadramento*) engloba três temáticas intercaladas entre si, iniciando uma breve síntese sobre os tipos de fabrico aditivo mais relevantes ao estudo (*2.1.Tipos de fabrico aditivo*). Trata ainda de um levantamento de investigações realizadas tendo em conta os dois materiais em estudo: o fabrico aditivo com celulose (*2.2. FA com celulose*) e o fabrico aditivo com argila (*2.3.FA com argila*).

1.O **Fabrico Aditivo com celulose**, relativo a investigações que usam a celulose como material base;

2.O **FA com argila**, relativo a investigações que usam a argila como material base.

O capítulo três (*3.O papel e a celulose*) engloba três temas, iniciado por uma breve síntese sobre a produção do papel (*3.1. A produção do papel*) e as suas etapas até a manipulação do produto final, um breve resumo sobre a matéria-prima em estudo (*3.2. A celulose*) e por último a aplicação do papel em arquitetura e outros campos de utilização (*3.3.A aplicação do papel*).

1.A **produção do papel**, engloba o ciclo de vida do papel, desde a fase de plantação, à recolha da madeira na floresta, produção da pasta e por fim, a produção do papel e transformação.

2.A **celulose**, relatando os dois tipos de pasta utilizados nesta investigação (*3.2.1.Pasta de celulose em folha branca*) e (*3.2.2.Pasta de celulose em pó branqueada*).

3.A **utilização do papel em diversos campos** de conhecimento através da aplicação do papel em materiais de construção (*3.3.1.Materiais de construção em arquitetura*) e a utilização em áreas científicas distintas (*3.3.2.Outros campos de aplicação*).

O capítulo quatro (*4. Materiais e testes de extrusão*) encontra-se dividido por três subcapítulos, o primeiro (*4.1. Introdução*), o segundo (*4.2.A celulose e o Amido*), dando-se a conhecer as diferentes misturas à base de celulose idealizadas, e por fim, o último subcapítulo (*4.3. A celulose e a argila*), demonstrando-se o comportamento adotado pela argila quando em contacto com a celulose. No final de cada subcapítulo, faz-se referência a uma breve conclusão, onde se realiza uma comparação entre os resultados obtidos ao longo deste, (*4.2.6. Conclusões*) e (*4.3.4. Conclusões*).

**1.A celulose e o amido**, engloba todas as misturas definidas, a *Mistura A* (4.2.3.), *Mistura B* (4.2.4.) e *Mistura B.1* (4.2.5.), além destas também retrata os testes realizados até a escolha das referidas (*4.2.1. Estudos prévios*) e o modo de preparação do amido, informação comum a todas as misturas (*4.2.2. Preparação do Amido*).

**2.A celulose e a argila**, engloba todas as misturas definidas, a *Mistura C* (4.3.2.) e *Mistura D* (4.3.3.), além destes também faz referência aos estudos prévios realizados anteriormente, dando a conhecer quais os potenciais elementos a tratar com a utilização da celulose numa mistura com potencialidades inovadoras.

O capítulo cinco (*5. Desenvolvimento do protótipo de uma parede*) encontra-se dividido ao longo de seis subcapítulos, um primeiro referente ao conceito por detrás do estudo de caso (*5.1. Ideial Conceito*), um segundo referente ao desenvolvimento do modelo paramétrico e todos os passos adotados até à sua concretização do (*5.2. Desenho do modelo computacional paramétrico*), um terceiro onde retrata a geração do G-Code após a manipulação do desenho paramétrico (*5.3. G-Code*), outro referente ao fabrico aditivo do modelo e as suas fases de estudo (*5.4. Fabrico aditivo do modelo*).

**1.O desenho do modelo computacional paramétrico**, divide-se ao longo de três fases, uma primeira referente à *Geração da malha hexagonal e suas variações* (5.2.1.), uma segunda referente à *Geração das pirâmides truncadas inferiores* (5.2.2.) e por fim a *Geração das pirâmides truncadas superiores* (5.2.3.).

**2.O fabrico aditivo do modelo** divide-se ao longo de cinco momentos, a (*5.4.1. Impressão*), a (*5.4.2. Secagem*), dentro desta situa-se o estudo da retração e deformação das peças até a fase final do modelo, o (*5.4.3. Acabamento*), a geração dos (*5.4.4. Encaixes*) para a sustentação da parede e por fim, o desenvolvimento do (*5.5. Produto final*).

O capítulo seis *Conclusões* (6.) apresenta as conclusões referentes a esta investigação científica (*6.1. Conclusões prévias*) e possíveis indicações para trabalhos futuros na área (*6.2. Trabalhos futuros*).

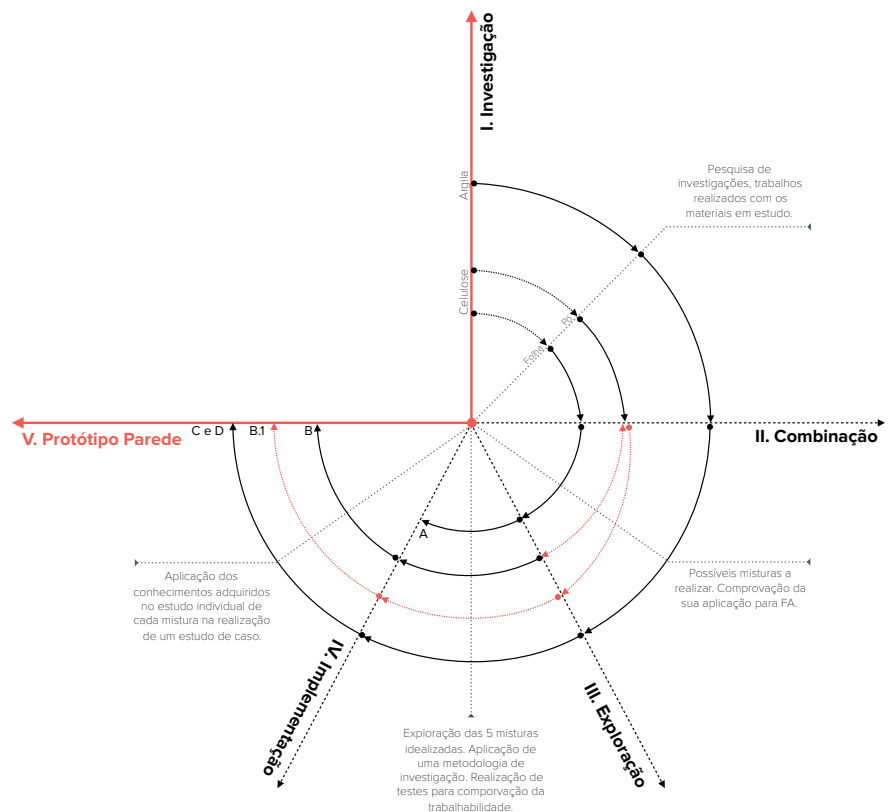
O capítulo sete *Bibliografia* (7.) dá a conhecer a bibliografia utilizada para a geração desta investigação.

O capítulo oito *Anexos* (8.) retém todos os anexos importante a acrescentar ao estudo lançado.

# 1.4. Metodologia de trabalho

**Esquema 1.01.** Esquema representativo dividido ao longo de cinco fases de estudo, com o objetivo de demonstrar a metodologia de trabalho adotada em cada uma dessas fases, com o mesmo propósito final, obtenção de misturas à base de celulose para aplicação no FA.

Para a realização deste estudo, a metodologia adotada resultou em cinco ciclos de trabalho, divergentes entre si pela diferenciação das tarefas programadas, mas complementares pois focam-se todos rumo ao mesmo objetivo de trabalho, a busca de novas misturas para FA. Sem a realização de uma pesquisa sobre eventuais trabalhos sobre o tema em questão, não seria possível lançar algumas propostas de misturas. O esquema abaixo tem por objetivo retratar todo o percurso realizado e a distribuição das diferentes etapas.



Acompanhando a leitura do esquema acima apresentado, o primeiro ciclo *I. Investigação*, dedica-se ao levantamento de trabalhos e investigações realizadas com o propósito da procura de novas de formas de FA ou materiais. Selecionou-se somente aqueles trabalhos ou investigações que visam o tratamento de técnicas utilizadas para o uso da celulose e da argila.

Através do tratamento da informação obtida no ciclo inicial, o segundo ciclo de estudo *II. Combinação*, pretende demonstrar um conjunto de possíveis misturas lançadas, misturas à base de celulose e misturas à base de argila, comprovando através de testes iniciais a sua trabalhabilidade e aplicabilidade no FA e arquitetura. Desta fase partem quatro segmentos para a seguinte com o propósito de demonstrar que de uma lista, somente cinco misturas foram propícias para FA.

A terceira fase ou ciclo de estudo *III. Exploração* visa explorar as cinco misturas definidas, através do estudo individual de cada uma, respeitando um plano traçado, com a programação de um conjunto de testes com o objetivo de responder a parâmetros definidos. Depois de comprovadas serão aplicados os seus conhecimentos.

A quarta fase *IV. Implementação*, resulta na finalização e validação dos estudos individuais de cada mistura, partindo da fase anterior somente quatro misturas, aquelas de melhores resultados apresentaram na fase anterior *III. Exploração*. Estas misturas serão utilizadas para fins maiores que somente pequenos testes de estudo. A intenção parte para a criação de modelos arquitetónicos.

Validadas as quatro misturas, estas serão implementadas num estudo de caso, *V. Kusudama Wall*, estudando a sua trabalhabilidade e comportamento quando aplicados no mesmo contexto, um modelo de parede, a Kusudama Wall.







## 2. Enquadramento

“The advent of Additive Manufacturing (AM) of ceramic, brought unprecedented possibilities for the building industry while exploring and incorporating components with specific design requirements. It definitively reshaped and expanded the boundaries of what’s possible to achieve with masonry constructions and opened new domains with multiple angles of study and experimentation and with a large industrial potential”(Cruz et al., 2017).

Para a elaboração de um enquadramento, o presente capítulo menciona um conjunto de artigos, trabalhos, investigações e pesquisas no âmbito do fabrico aditivo, explorando a área de aplicação das matérias-primas em estudo, a celulose e a argila. Estas compilações pretendem auxiliar à definição de um campo de aplicação do tema em estudo, o fabrico aditivo de elementos arquitetónicos com celulose e/ou argila, assim como demonstrar que este carece de muita investigação. São alguns os estudos realizados, sendo esses reduzidos na área de intervenção pretendida, nomeadamente para a impressão com pastas à base de celulose. A possibilidade de produzir componentes à base de celulose é uma nova oportunidade para aplicação na indústria da construção, explorando novas técnicas de fabricação, técnicas de fabrico aditivo, assim como a produção de componentes cerâmicos, que segundo Knaack (2014) possibilita a exploração e a incorporação de determinados componentes com requisitos específicos para aplicação num projeto de arquitetura.

Com isto, existem múltiplos processos de fabrico destes componentes, sejam em celulose ou argila, mas nem todos eles se aplicam a estes materiais compósitos. Estas dividem-se em três grupos, os processos de ligação, no qual se encontra incluída a técnica de SLS, SLA e LOM, os processos de deposição, FDM e extrusão da pasta e por fim, a modelação com pasta. Estas técnicas de produção abriram um campo com uma vasta aplicação em diversas áreas possibilitando a obtenção dos mais variados modelos, onde a personalização em massa de componentes, sejam eles em cerâmica ou celulose tornar-se-ão a tecnologia inovadora para a geração de edifícios (Cruz et al., 2017).



## 2.1. Tecnologias de Fabrico Aditivo

Como enunciado anteriormente, existem várias possibilidades de técnicas para o FA, mas nem todas elas apresentam características adequadas à produção e otimização de componentes à base de celulose e argila. As tecnologias de FA dividem-se em três grupos, os processos de ligação, os processos de deposição e os processos de modelação. Selecionou-se um conjunto de técnicas que melhor se enquadram nos materiais em estudo e recursos disponibilizados. Ainda existem desafios a serem superados no que toca à customização de componentes para a indústria de construção (Cruz et al., 2017), e a fabricação de elementos à base de celulose é um ramo ainda muito vasto a ser explorado, mas com elevada potencialidade.

### 2.1.1. Processos de ligação (Binding processes)

As técnicas presentes neste grupo funcionam de igual forma, o seu processo consiste na subsequente deposição de uma simples camada de um material, seja ele em pó, líquido ou folha sobre o volume total de impressão, onde um laser desenhará cada camada do objeto pretendido (Warnier et al., 2014).

#### **Stereolithography (SLA)**

A Stereolithography ou estereolitografia foi a primeira técnica de fabrico aditivo a ser comercializada baseando-se na utilização de fotopolimerização, técnica muito usual na indústria do papel para a gravação de relevos (Warnier et al., 2014), Figura 2.01. A resina de fotopolimerização utilizada, solidifica após cada secção transversal, sendo que a primeira é dada sobre uma plataforma e submersa imediatamente num material líquido. Esse processo repete-se até que todo o objeto esteja desenhado e concluído. Existe uma variedade de resinas com diferentes propriedades semelhantes aos plásticos, incluindo a borracha. As suas cores são muito limitadas, verificando-se maioritariamente a presença de resinas transparentes, translúcidas e opacas. A SLA é uma técnica de impressão com elevada precisão e o seu processo de fabrico é bastante rápido. Diferente de outros processos, esta técnica de impressão não utiliza material de suporte. Esta técnica foi desenvolvida por Chuck Hull em meados dos anos 80. Em 2012 a FormLabs apresentou a primeira impressora 3D, desktop, baseada no processo de estereolitografia.

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

A técnica de SLS é outro método de fabrico aditivo, no qual um laser com elevada potência derrete e une o material em pó através de calor (Warnier et al., 2014). Pequenas camadas de pó são depositadas por um rolo sobre uma superfície, para que um laser sintetize cada camada da secção. O material de suporte não é necessário, uma vez que o pó funciona como estrutura de suporte. É um processo relativamente rápido e adequado para a fabricação de estruturas ou partes destas e produção de peças com camadas limitadas. A criação de objetos pela fusão de pó demonstrou ser um processo com elevada potencialidade e adaptabilidade para a impressão 3D. Ao longo dos anos, muitos processos foram desenvolvidos, baseados na técnica de SLS recorrendo à utilização de materiais compósitos como o metal, cerâmica, vidro e areia. Esta técnica foi desenvolvida pelo aluno Carl Deckard e professor Joe Beaman da Universidade do Texas, em meados dos anos 80. Oito anos depois fundaram a DTM Corp. para comercialização das primeiras impressoras 3D desktop.

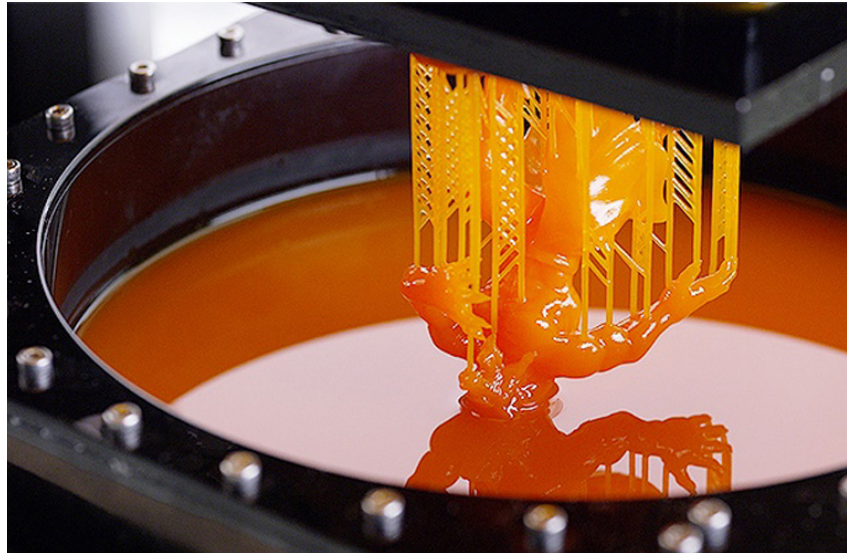
### **Powder bed and inkjet 3D printing (BJ)**

A técnica de Powder bed and inkjet 3D printing, também conhecida como Binder Jetting (BJ) é uma tecnologia de fabrico aditivo no qual dois materiais dão origem ao modelo, geralmente um em pó, o amido ou gesso, e um agente com função de ligante, uma cola que tem por função ligar as diferentes camadas de gesso, Figura 2.02. O processo de execução do modelo dá-se pela deposição de uma camada de gesso em pó, onde posteriormente se deposita o agente aglutinador, a cola, formando uma camada. Este processo é repetido diversas vezes até que o modelo esteja completo. Quando o modelo está completo, o pó não ligado ou utilizado para a produção do modelo é automaticamente removido através de um processo denominado de pulverização. O pó pode ser reutilizado posteriormente. Esta tecnologia foi desenvolvida pelos investigadores do MIT (Massachusetts Institute of Technology) em 1993.

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

A técnica de LOM produz objetos através da laminação de folhas finas de material, umas sobre as outras. As secções transversais que definem o objeto são cortadas com tesouras ou através de CNC (Warnier et al., 2014). Quando esta é concluída, o modelo encontra-se dentro de um bloco, sendo necessária a sua remoção. Esta técnica tem um uso limitado, aquando o uso do papel, o modelo é construído, com baixo custo económico e facilmente produzido, Figura 2.03. Aquando a finalização o modelo apresenta uma textura semelhante à madeira, que mais tarde pode ser colorido por jato de tinta. Devido à sobreposição e densidade do material, durante o processo de fabrico, uma vez que o material de suporte é exatamente o negativo do objeto este não necessita da introdução na fabricação do objeto. A técnica LOM foi desenvolvida pela California-based Helisys, Inc. em meados dos anos 80, entrando em decadência anos depois, foi a Mcor Technologies que

**Figura 2.01.** The Complete Guide to Stereolithography (SLA) in 3D Printing, desconhecido, 2017. Retirado do site: [www.3dnatives.com](http://www.3dnatives.com)



**Figura 2.02.** Binder Jetting process printer, Tyler Koslow, 2016. Retirada do site: [www.3dprintingindustry.com](http://www.3dprintingindustry.com)

**Figura 2.03.** Mcor Technologies printer, Mcor Technologies, 2014. Retirada do site: [www.flickr.com](http://www.flickr.com)



reavivou esta tecnologia pela introdução de modelos coloridos e outras potencialidades.

### **2.1.2. Processos de deposição (Deposition Processes)**

Os processos de deposição dão-se pela extrusão de um material líquido através de um bico na cabeça da impressora, dando-se a deposição do material *layer by layer*, sobre uma plataforma fixa ou flexível. Ao contrário do referido anteriormente, os modelos não se encontram embebidos nos materiais, o que provocará a necessidade de criação de estruturas de suporte, para a criação das geometrias.

#### **Fused Deposition Modeling (FDM)**

A técnica de FDM ou FFF (Fused Filament Fabrication) é um processo de impressão 3D, no qual um filamento termoplástico é aquecido e extrudido pela ponta do bico de extrusão. O objeto é desenhado quando o filamento ainda se encontra derretido, que após cada camada extrudida e desenhada seca. O processo é similar à extrusão de cola quente, esta endurece logo após o contacto com a superfície. Esta técnica trabalha maioritariamente com materiais termoplásticos, como o Nylon, ABS, PLA e policarbonato (Warnier et al., 2014).

A técnica de FDM, Figura 2.04, é limitada à impressão de objetos com uma só cor, mesmo que esta apresente duas cabeças de impressão. Não existe material de suporte associado a esta técnica, este deve ser gerado e impresso com o mesmo material e posteriormente partido, ou impresso com um material termoplástico a partir da segunda cabeça de impressão. Geralmente todas as impressoras desktop apresentam somente uma cabeça de impressão. A impressoras de FDM foram desenvolvidas por Scott Crump, em meados de 1980 e comercializadas pela Stratasys, empresa fundada pelo mesmo. A expiração da patente em 2009 gerou o aparecimento de muitas outras impressoras desktop, como as RepRap, ultimaker ou Makerbot. O termo geralmente utilizado FDM, uma abreviação de Fused Deposition Modeling, foi gerada pela Stratasys, mais tarde aparecendo a abreviação FFF de Fused Filament Fabrication, adotada pela RepRap, como uma alternativa.

#### **Pasta de extrusão (Paste extrusion)**

O processo de extrusão da pasta é muito semelhante à técnica de FDM, onde o material é extrudido através de um bico e depositado sobre uma cama (Warnier et al., 2014). Em vez de ocorrer o processo de aquecimento e extrusão do filamento, é utilizado uma pasta com determinada consistência, Figura 2.05, que mais tarde é curada e seca ao ar ou em estufa. Pela facilidade de execução e manutenção com esta técnica, quase todos os materiais podem ser utilizados para impressão. As pastas mais comuns são pastas à base de cimento e betão, comida como chocolate, biomateriais, argila e outros variados compósitos, como a celulose na presente investigação. A maioria das impressoras 3D para extrusão de pasta foram desenvolvidas como parte de projetos de investigação, como a Fab@Home 3D printer, a primeira impressora 3D disponível ao público e uma das duas primeiras impressoras com

código aberto. Nesta fase todas as restantes máquinas de FA ainda se encontravam patenteadas. O projeto foi desenvolvido pelos alunos da Universidade de Cornell, do departamento de Mecânica e Engenharia Aeroespacial. Este projeto, lançado em 2006 foi inspirado na história do primeiro computador DIY, o modelo 'Altair 8800'<sup>1</sup> a meados de 1975. A primeira versão da Fab@Home possuía duas seringas ou bicos de extrusão que podiam ser usadas em simultâneo. Uma das principais vantagens da deposição da pasta através de seringas estava relacionada com a ampla gama de materiais que poderiam ser utilizados para FA, qualquer material líquido, em pasta, gel poderia ser extrudido gerando o modelo tridimensional.

### **2.1.3.Processos de modelação (Modeling processes)**

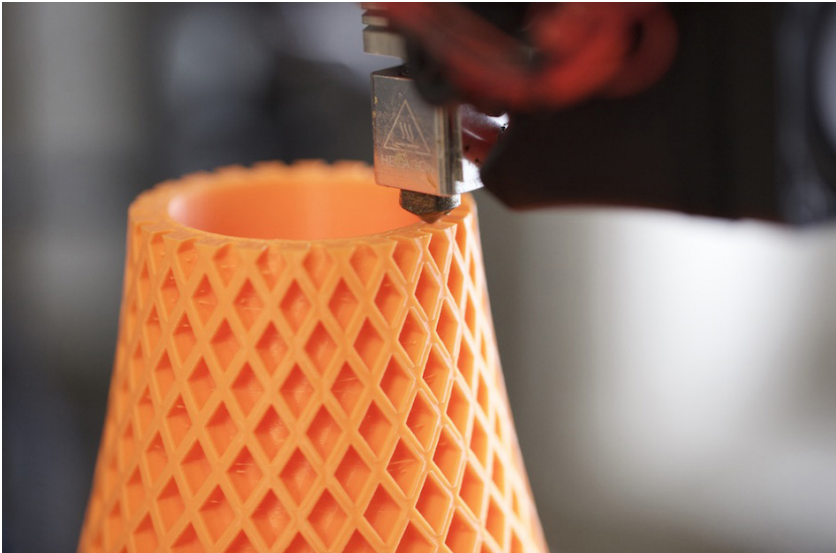
Os processos de modelação dão-se pela produção de uma polpa moldável e posterior colocação dessa num molde gerado para a obtenção de um determinado produto. Esta consegue adaptar-se à forma por mais complexa que possa ser devido à fluidez que a pasta apresenta. Depois de colocada no molde, a pasta é sujeita a uma secagem até que a polpa utilizada apresente resistência suficiente para o objetivo pretendido.

#### **Modelação com polpa de papel (Paper pulp molding)**

A modelação com pasta de papel é uma outra técnica associada a um grupo distinto das referidas anteriormente, uma vez que esta se baseia no material desperdiçado utilizado na indústria, adicionando um pouco de água para a criação de uma pasta (Thompson, 2015). Esta pasta é colocada sobre uma molde previamente obtido por outra técnica distinta e moldado até obter a sua forma, Figura 2.06. Depois de seco é retirado do molde assumindo então a forma pretendida. A pasta de papel é reciclagem e biodegradável. Esta técnica é mais conhecida pela produção de caixas dos ovos, embalagens e produtos medicinais.

1. O Altair 8800 foi o primeiro microcomputador desenhado pela companhia americana Micro Instrumentation and Telemetry Systems (MITS) a 1974. O modelo foi produzido tendo como base de desenvolvimento o estudo do CPU Intel 8080. Este modelo gerou uma revolução da procura de novas tecnologias de computação, que mais tarde conduziu à fundação da Microsoft. (Retirado do site: [www.history-computer.com](http://www.history-computer.com))

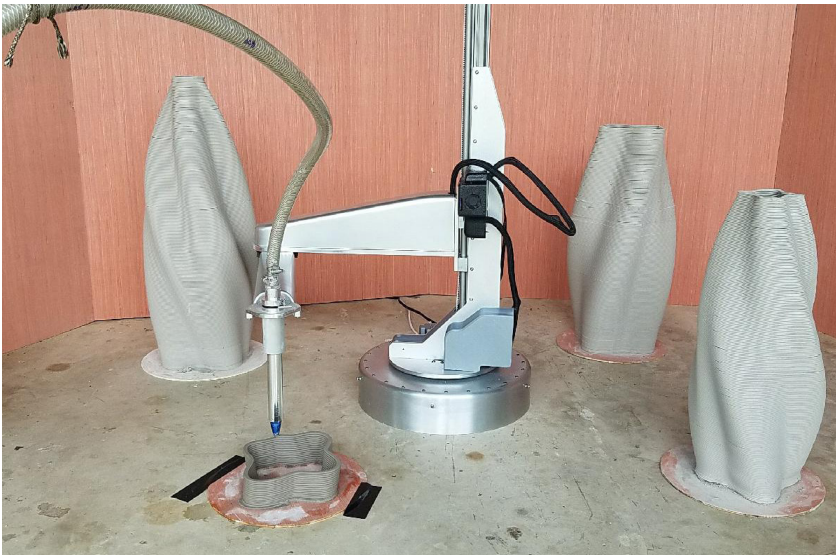




**Figura 2.04.** How does an FDM printer work?, Equipe Kimya, 2018. Retirada do site: [www.kimya.fr](http://www.kimya.fr)

**Figura 2.05.** Paste extrusion with a 3D potterbot, Emerging Objects, 2017. Retirado do site: [www.emergingobjects.com](http://www.emergingobjects.com)

**Figura 2.06** Pulp mold Block, Kazuhiko Hayakawa, 2016. Retirado do site: [www.kazuhikohayakawa.com](http://www.kazuhikohayakawa.com)





## 2.2. Fabrico Aditivo com celulose

Desde os primórdios do processo de humanização, que a necessidade de comunicação obrigou à utilização dos mais dispares materiais que a natureza oferecia, para registar símbolos e sinais que pudessem ser o meio numa comunicação imediata ou diferida entre emissor e recetor (Lopes, 2010). Com a procura de um meio de comunicação acessível e de baixo custo, o papel conseguiu sobreviver aos requisitos da sociedade, implementando-se no cotidiano, sem o qual hoje seria quase inimaginável viver. Este é produzido à base de celulose e esta pode facilmente adotar diversos propósitos, dando origem a diferentes tipos de papeis ou funcionando como elemento de agregação e resistência em diversos campos como nas argamassas. Os seus campos de investigação são cada vez maiores e a sua associação ao fabrico digital e prototipagem rápida é uma questão em continua evolução. Investigadores no campo da construção e tecnologia encontram-se a explorar as potencialidades da celulose para desenvolvimento de novos componentes.

*“A casa de um andar, de telhado plano, erguida numa plataforma quadrada e situada num espaço elevado, é toda envidraçada à volta; uma parede curva, em “S”, de tubos de cartão, divide o espaço habitacional da área das casas de banho. Por entre os tubos, entra a luz, que projeta padrões nos tetos e no chão” (Gossel e Leuthauser, 2005).*

Com uma mente brilhante Shigeru Ban<sup>1</sup>, arquiteto japonês, encontrou um novo propósito de construção à base de papel, estas funcionando como elementos estruturais e de revestimento. O que torna tão fascinante o seu trabalho é a conjugação que este proporciona ao combinar um simples material, como tubos de cartão e formar um ambiente capaz de proporcionar um espaço habitável, Figura 2.07. São inúmeras as soluções disponibilizadas tendo em conta a utilização do papel em construção.

1. **Shigeru Ban** é um arquiteto japonês, natural de Tóquio e nascido a 5 de Agosto de 1957. Frequentou de 1977 a 1980 a Southern California Institute of Architecture. De 1980 a 1982 estudou com John Hedjuk na Cooper Union School of Architecture. Antes de ter iniciado o seu atelier em Tóquio, trabalhou com Arata Isozaki. Ban utiliza frequentemente materiais invulgares nas suas construções, como o papel (Gossel e Leuthauser, 2005).

Numa vertente de exploração tecnológica da aplicação da celulose e do papel, no âmbito de FA destaca-se a Highcon Shape e a Mcor Technologies, fundadoras das impressoras 3D com papel, levaram a cabo o conceito de reprodução tridimensional, a partir do corte sucessivo de um conjunto de folhas de papel. Através da manipulação tridimensional em programas de manipulação 3D, recriam o modelo na íntegra transmitindo a informação para a impressora, onde esta vai cortando folha por folha até obter todo o protótipo pretendido, Figura 2.08. Esta tecnologia apresenta elevadas potencialidades, pela precisão conferida aos modelos, facto derivado do corte sucessivo de cada folha individualmente, sendo bastante económica e conferindo um acabamento simples ou realístico, de acordo com a escolha de cada utilizador.

Ronald Rael e Virginia San Fratello, Emerging Objects, dedicam-se à exploração de novos materiais, com potencialidades inovadoras, como a argila, sal, borracha, areia e o papel, sendo que o lema de estudo destes reside na abordagem de novos materiais com diversos tamanhos, onde a impressão 3D é a forma de tornar real boas ideias. Rael e San Fratello (2018) transformam materiais comuns em abordagens arquitetónicas excelentes, como a utilização do papel em pó para a produção de novos modelos impressos tridimensionalmente, Figura 2.09. Assim como a utilização da argila para criação de revestimentos de paredes entre outros, como será referido seguidamente.

Naldoni, Casarotto e Erioli, da Universidade de Bolonha, desenvolveram um trabalho em que o objetivo é investigar uma possível aplicação de estruturas de argila, roboticamente construídas para abrigos temporários em ambientes naturais de interesse turístico, onde construções permanentes não são permitidas. (Naldoni et al., 2018) Para a possibilidade de execução destes modelos utilizaram uma mistura de fibras de celulose, mistura de argila e solução de água e álcool, Figura 2.10.

Rosette Gault, propõe um novo material, composto à base de água de minerais de argila e fibras de celulose, que denominou de paperclay, este endurece ao ar livre e/ou pode ser cozido e vidrado em fornos (Gault, 2013). Esta mistura funciona de forma idêntica à cerâmica tradicional, mas a presença de fibras de celulose melhoram a trabalhabilidade do material. Conforme ilustra a Figura 2.11, o paperclay é um material resistente e pode ser modelado para a criação de protótipos não regulares. A sua fabricação é semelhante à fabricação de pastas de papel à base de papel marchê<sup>2</sup>.

Paul Gatenholm, professor do departamento de Tecnologia de Biopolímeros e investigador no grupo Polymer TA da Universidade de Tecnologia de Chalmers, conseguiu imprimir e secar objetos tridimensionais feitos inteiramente de celulose pela primeira vez com a ajuda de uma biopinter 3D” (Retirado do artigo da web, 2015). Sendo uma forma de

2. O papel marchê é um papel picado, amassado e esmagado, este origina uma massa, onde o papel é embebido em água, coado e posteriormente misturado com cola e gesso. Esta massa permite a elaboração de diversificados modelos, através da sua modelação. Foi uma arte desenvolvida na China, dois séculos antes de Cristo e em regiões das antigas Pérsia e Índia.

**Figura 2.07.** A utilização dos tubos de papel, para a produção de uma habitação, desconhecido, desconhecido. Retirado do site: [www.44arquitetura.com.br](http://www.44arquitetura.com.br)

**Figura 2.08.** Impressão de objetos reais em papel "Impressora 3D adiciona detalhes realistas em objetos de papel", Mcor, 2014.

**Figura 2.09.** Ronald Rael e Anthony Giannini estão a desenvolver papel impresso em 3D feito de papel de jornal reciclado, Kent Wilson, 2014. Retirado do site: [www.archidaily.com.br](http://www.archidaily.com.br)





**Figura 2.10.** Tests made with Comau NJ60 6 axis robotic arm, Co.de.iT, 2018.

**Figura 2.11.** Innovation in Paperclay Ceramic Arts, Rosette Gault, 2012.

**Figura 2.12.** Cellulose from wood can be printed in 3D, Peter Widing, 2015.





fabricação revolucionária, pretende combinar o uso da celulose com a impressão 3d, por se tratar de um material ilimitado e biodegradável, Figura 2.12. A intenção passa por dar origem a uma tinta a partir de nanofibras de celulose com um hidrogel. Após a impressão os modelos são secos em frigoríficos por forma a preservar a sua forma inicial.

A empresa Borregaard, desenvolveu um produto inovador, a Exilva MicroFibrillated cellulose ou MFC. Este produto é um novo aditivo de desempenho, com o objetivo de superar as tecnologias baseadas em óleos. Feito à base de fibras de celulose, pode funcionar como aditivo estabilizante, mostrando capacidades de reforço, podendo ser aplicado em diferentes contextos, como revestimentos, adesivos, cosméticos.

O Dr. Sebastian Pattinson e Professor A.J. Hart, investigadores do Massachusetts Institute of Technology (MIT), desenvolveram um projeto que consistia na utilização da celulose como componente estrutural, adicionando propriedades anti-bacteriais. De origem vegetal, não pode ser derretido como o PLA ou ABS, então chegou-se à conclusão que pode funcionar como material líquido. Começaram por descobrir o uso excepcional da acetona quando em contato com a celulose, obtendo um produto que pode ser facilmente modificado com propriedades extras e mais resistente que outros materiais como o PLA, ABS e Nylon, isto devido à capacidade da acetona dissolver o pó de celulose, evaporando facilmente e podendo ser reciclada. Para fazer a tinta, o pó de acetato de celulose foi dissolvido em acetona. A acetona foi escolhida como agente de dissolução, pois é barata, evapora rapidamente e pode ser facilmente reciclada para reutilização (Haria, 2017). Este material consegue matar 95% das bactérias quando expostas à luz UV, adicionando um corante de agentes antimicrobianos, o que permite que esta técnica seja adequada para a impressão de instrumentos médicos, devido à sua redução de bactérias após a impressão. Estas ferramentas podem ser úteis para configurações médicas remotas, onde existe a necessidade de ferramentas cirúrgicas, Figura 2.13.

Já os investigadores Dr. Gilberto Siqueira e Dr. Tanja Zimmermann, do Applied Wood Materials Laboratory and Center for X-ray Analytics, Empa - Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology, exploram as potencialidades da celulose, pelo facto de este material apresentar características de origem natural, ser biodegradável e ecológico. O biopolímero de celulose consiste em diversas cadeias de glicose, organizadas em estruturas longas e fibrosas. Em certos locais, as fibrilas de celulose mostram uma estrutura mais ordenada. O foco desta investigação visa desenvolver uma tinta à base de nanocristais de celulose, com o objetivo de potenciar uma consistência elástica e viscosa aquando a sua impressão. Após a sua impressão, estes modelos são curados com luzes UV, conferindo às peças fabricadas um nível elevado de rigidez. A composição química final, resultou de um conjunto de testes realizados anteriormente, derivado da trabalhabilidade da celulose. A maioria dos polímeros é repelente à água ou hidrofóbico, enquanto que a celulose atrai a água hidrofílica. Como resultado não são muito compatíveis (Siqueira et al., 2018). Desta vez, são as indústrias de automóveis e

embalagens que podem beneficiar do uso deste material, devido à sua resistência, mas também ter aplicações no campo da biomédica, para produção de implantes ou próteses, Figura 2.14.

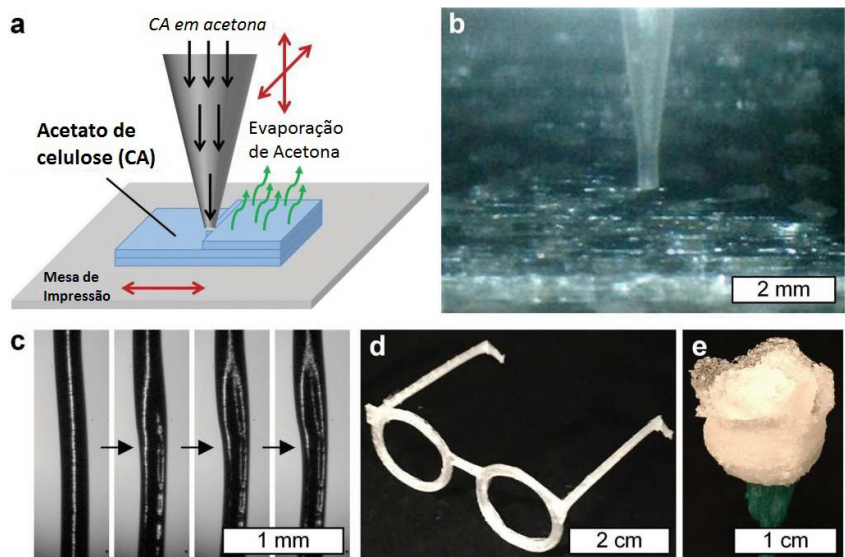
O grupo de investigadores The Mediated Matter group, encontra-se a desenvolver um conjunto de estruturas fabricadas com materiais compósitos à base de água, quitosano e celulose, como camada estrutural, que quando depositada numa película, pode fornecer quantidades variáveis de resistência à tração para a impressão, dependendo do volume de deposição (Tay et al., 2018). O quitosano é um derivado da quitina, encontrando-se em conchas de artrópodes, escamas de peixes e células fúngicas. Quando estes se fundem num hidrogel, o quitosano irá contrair e enrolar à medida que seca, a celulose irá adicionar flexibilidade e estabilidade ao compósito durante a secagem. Com o desenvolvimento da composição química da mistura, desenharam um mapa de design digital, para a fabricação de diversificadas estruturas.

O Aquahoja Pavilion é uma estrutura compósita à base de biomateriais, onde analisa elementos como a rigidez, flexibilidade e a resposta da sua envolvente ao calor e humidade, Figura 2.15.

*“Nós propomos o pavilhão Aquahoja como um sistema de revestimento de pele multi-material que combina um andaime reutilizável e uma pele biodegradável e sintonizável. Estas combinações são projetadas em mapas de dados ambientais e fabricadas através da deposição robótica. (...) O pavilhão Aquahoja é concebido como um sistema integrado em mapas com comportamento funcional que trabalham tanto a pele como os membros. No entanto para garantir a estabilidade da construção, construiu-se um esqueleto ovaloide, com cinco metros de altura, impresso separadamente e ligado por painéis biopolímeros” (Duro-Royo et al., 2018).*

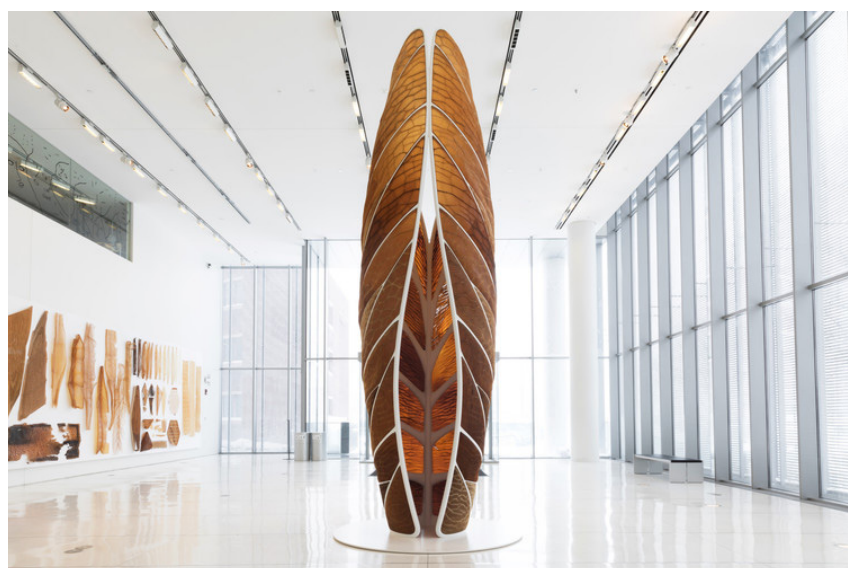
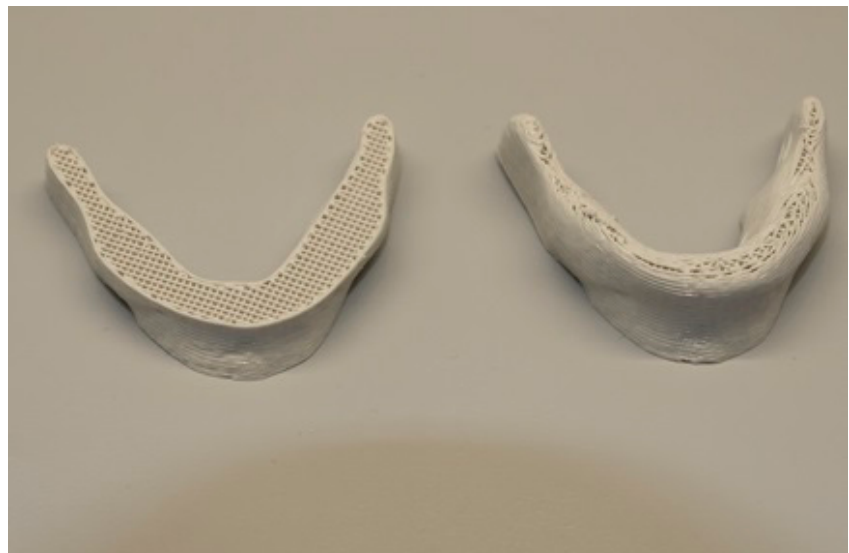
Na universidade de Nova York, o departamento de arquitetura, desenvolveu um exercício entre alunos, que consistia na fabricação de estruturas em casca, como trabalhos experimentais, utilizando o papel para o desenvolvimento das finas estruturas de carácter temporário, com a capacidade de se desintegrarem totalmente e desaparecerem após a sua curta vida útil (Davidson e Rafailidis, 2018). Inicialmente realizaram uma pesquisa exaustiva sobre a anatomia da fibra, onde retratam o comportamento, exploram a sua trabalhabilidade e origem, para numa fase posterior aplicarem a análise da fibra escolhida no desenvolvimento de uma estrutura de casca fina, Figura 2.17. O primeiro projeto, apresenta uma proposta de açúcar e bagaço para criar uma estrutura temporária (Davidson e Rafailidis, 2018). O segundo projeto apresenta uma proposta à base de relva, onde explorou o uso de relva disponível gratuitamente (Davidson e Rafailidis, 2018). O terceiro projeto baseia-se na utilização de polpa de algodão húmida como membrana pneumática. E por último, o quarto projeto utiliza fibras de Cattail secas com vento. Este projeto foi criado considerando as flores de táboa como fonte de fibras de celulose (Davidson e Rafailidis, 2018).

**Figura 2.13.** (A) Um esquema do processo de impressão de acetato de celulose 3D. (B) Acima da foto próxima do processo. (C) Estágios de acetato evaporando a partir da tinta impressa 3D. (D & e) Estruturas de teste 3D impresso na tinta, Advanced Science News, 2017. Retirado do site: [www.3dprintingindustry.com](http://www.3dprintingindustry.com)



**Figura 2.14.** Jawbone 3D printed with cellulose ink, Empa, 2017. Retirado do site: [www.3dprint.com](http://www.3dprint.com)

**Figura 2.15.** The aguahoja Pavilion, MIT Media Lab, 2018.





**Figura 2.16.** The aguahoja Pavilion, MIT Media Lab, 2018.

**Figura 2.17.** Experiments in thin shell, cast paper structures addressing form-finding fabrication, structural behavior and decay, Georg Rafailidis, 2018.

**Figura 2.18.** Object of the Moment: PaperBricks, WooJai Lee, 2016. Retirado do site: [www.woojai.com](http://www.woojai.com)





O studio woojai, foca-se num método cada vez mais utilizado, onde explora as potencialidades da reutilização do papel de jornal, para a construção de blocos de papel, com grande força, resistência e textura. Esta técnica é utilizada a partir de moldes, onde se deposita a pasta no seu interior. Esta técnica ainda hoje é muito utilizada para a produção de embalagens, suporte de copos, caixas de ovos, entre outros, Figura 2.18.

A produção de alimentos é outro setor que se encontra a investigar as potencialidades da celulose, mas desta vez para ser implementada na comida. Os membros do concelho de pesquisa em engenharia e Ciência Físicas, EPSRC e a UK Knowledge Transfer Network, KTN, encontram-se a trabalhar na indústria de alimentos para utilização futura de partículas de celulose como blocos de construção para impressão 3D. O que este grupo de investigadores pretende é integrar a fabricação de aditivos com técnicas atuais de produção de alimentos. Assim o principal mote de investigação passa pela necessidade de resolver problemas no que toca à distribuição de alimentos mundialmente, enriquecendo o campo da produção alimentar. Com isto, pretendem desenvolver uma tinta comestível, que possa solidificar, sendo a celulose a potencial substância construtora de alimentos comestíveis.

Por se tratar de um polímero muito abundante na natureza não é tóxico, ainda é controverso pois não existem enzimas para digerir a celulose, sendo esta é difícil de dissolver, o que levanta a questão da sua aplicação em produtos alimentares. Esta investigação ainda se encontra nos seus estágios iniciais, ainda não se verificando qualquer conclusão acerca disso.

A indústria alimentar vê a celulose como um bloqueador de humidade, colocando pó de celulose, em pedaços minúsculos que serve para revestir o queijo e impedir que este se aglomere. Esta funciona como aditivo alimentar, utilizada maioritariamente em alimentos processados, para engrossar e estabilizar alimentos, substituir gorduras e aumentar o teor em fibras e também para diminuir a necessidade de ingredientes como óleo e farinha. Esta necessidade de colocar celulose nos produtos, esta a aumentar devido às exigências das pessoas preferirem alimentos com pouca gordura ou sem gordura, mas mantendo a textura cremosa.



## 2.3. Fabrico Aditivo com argila



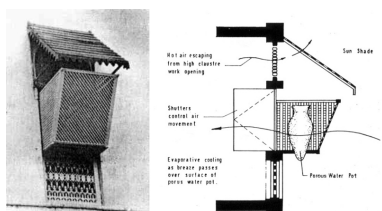
**Figura 2.19.** Honeycomb Brick, Building Bytes, 2013.



**Figura 2.20.** Ribbed Brick, Building Bytes, 2013.



**Figura 2.21.** X-Brick, Building Bytes, 2013.



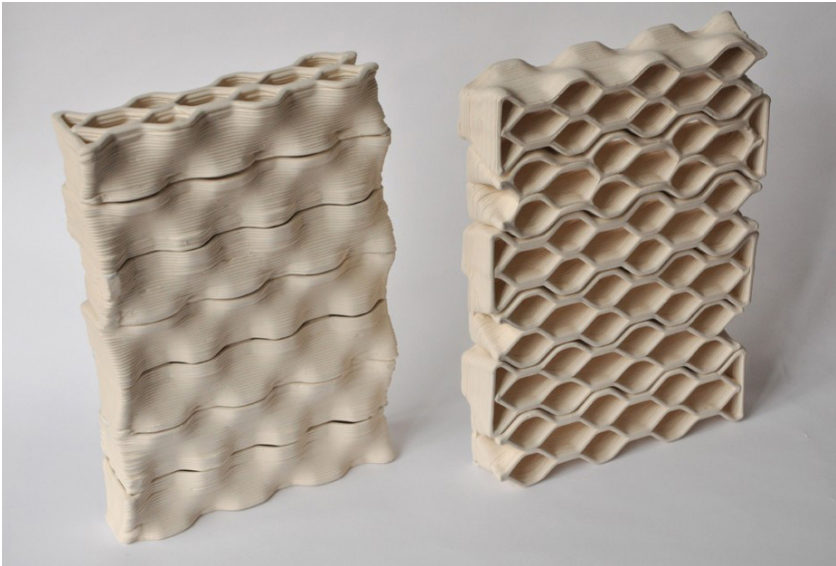
**Figura 2.22.** Muscatese Evaporative cooling window, Emerging Objects, 2015.

*“The past decades has been by a rediscovery of architectural ceramics - a material system that has long served merely as a practical surface treatment for buildings, but that is now coming into its own as a multi-functional, intensely aesthetic boundary layer for buildings”*(Bechthold, 2015).

O investigador da Building Bytes, Brian Peters, tirou partido das redescobertas e potencialidades da cerâmica, para desenvolver um projeto, que consistia na manipulação de três distintos blocos. Peters recorreu a um sistema de extrusão simples e personalizado, permitindo assim, que os tijolos fossem fabricados com uma receita líquida de argila, utilizada normalmente para a modelação de peças em cerâmica (Peters, 2013). O objetivo é desenvolver uma nova tecnologia tirando partido das novas técnicas de FA aplicadas na indústria da construção. O primeiro modelo, Honeycomb Brick, Figura 2.19, tijolos favos de mel, podem rapidamente ser empilhados em três distintas orientações, funcionando como parede interior, exterior ou proteção solar e os Ribbed Bricks, Figura 2.20, desenhados para dar origem a colunas. Os X-Brick, Figura 2.21, projetados para maximizar a opacidade visual através das paredes e otimizar o tempo de impressão, tendo em conta as construções não modulares (Peters, 2013).

Os Emerging Objects, dedicam-se ao estudo de materiais inovadores, contando com projetos impressos em argila, sal e areia. O projeto Cool Brick, Figura 2.24, consiste em tijolos cerâmicos porosos, impressos em 3D, fixados em argamassas, onde cada tijolo absorve água, como uma esponja, e é projetado como uma treliça tridimensional que permite que o ar passe através da parede (San Fratello e Rael, 2015). De acordo com as correntes de ar, a água é absorvida e retida no seu interior, onde mais tarde ocorre o fenómeno de evaporação permitindo assim um contínuo resfriamento interior proporcionado pela movimentação do ar frio. O desenho é inspirado nas Muscatese Evaporative cooling window, Figura 2.22.

A Seed Stich Wall é um protótipo para um sistema de revestimento cerâmico impresso 3D, Figura 2.25 Enquanto que a maioria das aplicações de impressão 3D demonstra como é esta permite uma diferenciação de massa, o Seed Stich é um exercício de complexidade elevada e



**Figura 2.23.** Brick being printed on a desktop 3D printer, HoneyComb Brick, Building Bytes, 2013.

(A primeira montagem é a combinação do blocos na horizontal, originando uma parede fechada e, a segunda montagem são os blocos na horizontal rodados, originando uma parede com aberturas)

**Figura 2.24.** Cool Brick Wall assembly, Emerging Objects, 2015. retirado do site: [www.emergingobjects.com](http://www.emergingobjects.com)

**Figura 2.25.** Seed Stitch Wall, Emerging Objects, 2016. retirado do site: [www.emergingobjects.com](http://www.emergingobjects.com)



permite a influencia da mão, gravidade, temperatura e as tentativas do equipamento imprimir uma forma instável para produzir a diferença (San Fratello e Rael, 2016). Cada peça apresenta uma curvatura que permite que esta seja pendurada sobre um molde de metal galvanizado e dobrado em 'J' para suportar todas as telhas.

O Laboratório de Cerâmica Avançada, do Instituto de Design de Guimarães (IDEGUI), dedica-se à exploração da cerâmica no FA, tendo desenvolvido algumas pesquisas e investigações nesta área. Duas das quais baseiam-se na criação de um modelo estrutural de parede. A Wave Wall, Figura 2.26, foi a primeira investigação realizada no programa da impressão com argila, onde se recorreu às dimensões base de um tijolo comercial adaptado à sua configuração através da introdução de uma forma livre irregular (Cruz et al., 2017). Este modelo foi definido em Grasshopper, com o objetivo de fazer variar a sua estrutura interior e de testar variadas geometrias através do método de análise até à sua performance final. Foram analisadas quatro soluções de estruturas internas, uma quadrangular e uma hexagonal, juntamente com padrões curvos.

A Odin Wall explora o potencial de associação de sistemas computacionais com a impressão através das técnicas de fabrico aditivo, onde predomina o desenvolvimento de tijolos de forma livre em cerâmica. Este sistema dedica-se especialmente à construção de edifícios com formas curvas, nomeadamente edifícios desenvolvidos e originados a partir de superfícies de revolução, Figura 2.27.

*“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”*(Carvalho, 2018).

O projeto consiste na criação de uma estrutura com forma abobadada, constituída por hexágonos irregulares, Figura 2.28. Sobre o pátio é criada uma geometria da superfície que mais tarde seria substituída por uma malha hexagonal irregular, criando uma divisão das estruturas em blocos. Estes seriam todos impressos tridimensionalmente com argila, recorrendo a programas computacionais para a manipulação 3D. A sua estrutura limita-se somente ao sombreamento de um vão envidraçado, de modo a diminuir a quantidade de luz fletida para o interior, o que em contrapartida criará um espaço mais ameno com temperaturas confortáveis.

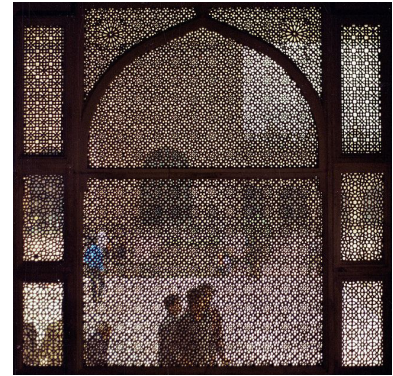
Os blocos Polybrick, foram desenvolvidos pelo grupo de investigadores da Sabin, num recenseamento de oito anos de pesquisa. A produção de blocos ou telhas, contém uma longa história na qual faz referência à tecnologia e arquitetura. Estes blocos dão origem a um projeto complexo em termos de design e forma caracterizado pela sua geometria avançada, Figura 2.31. Os módulos usados na série Polybrick foram impressos numa impressora 3D ou moldados com a sua forma positiva (Dun et al., 2018).



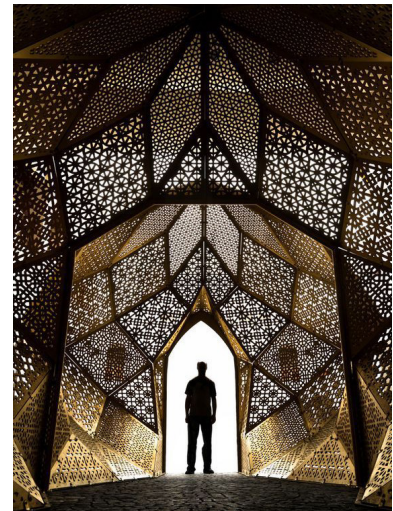
O projeto Mashrabiya 2.0 é um modelo de fachada com caráter evaporativo, onde as técnicas tradicionais de construção em arquitetura são substituídas pela montagem de peças cerâmicas impressas tridimensionalmente. Os Mashrabiya consistem em telas de rendas árabes comuns criadas a partir de uma série de pequenas peças de madeira que controlam a luz, o fluxo do ar e a privacidade. O Mashrabiya 2.0 adapta essas funções e em simultâneo aborda as limitações de performance e a materialidade da Mashrabiya tradicional, Figura 2.26 (Hunt, 2018).

O que Erin Hunt propõe é a integração da impressão 3D, para a produção de uma série de módulos em cerâmica originando três modelos. A coluna, o cone truncado e o hemisférico, Figura 2.32. Estas são projetadas tendo em conta um padrão de modo a manipular a passagem do ar. Depois de produzidas dão origem a um conjunto de peças empilhadas sob um sistema de tubulação perfurado, que consiste na perfuração para pulverização de vapor de água nas cerâmicas não vitrificadas, resfriando ativamente os espaços à medida que o ar flui (Hunt, 2018).

Todos os projetos destacados ao longo deste subcapítulo, utilizam a mesma técnica de FA para a obtenção de modelos, tais como o processo de deposição através da extrusão de pasta de argila, excluindo os Blocos PolyBrick que são obtidos através da técnica de SLS. Todos eles se baseiam na obtenção de um projeto final através da multiplicação de um ou mais elementos. O destacamento destes projetos destinar-se-á à execução do modelo final desta investigação científica, laborando como base de estudo ao produto final.



**Figura 2.26.** Mashrabiya tradicional, Jaali in Salim Chishti Tomb, India, Hans A. Rosbach, desconhecido. Retirado do site: [www.starsinsymmetry.wordpress.com](http://www.starsinsymmetry.wordpress.com)

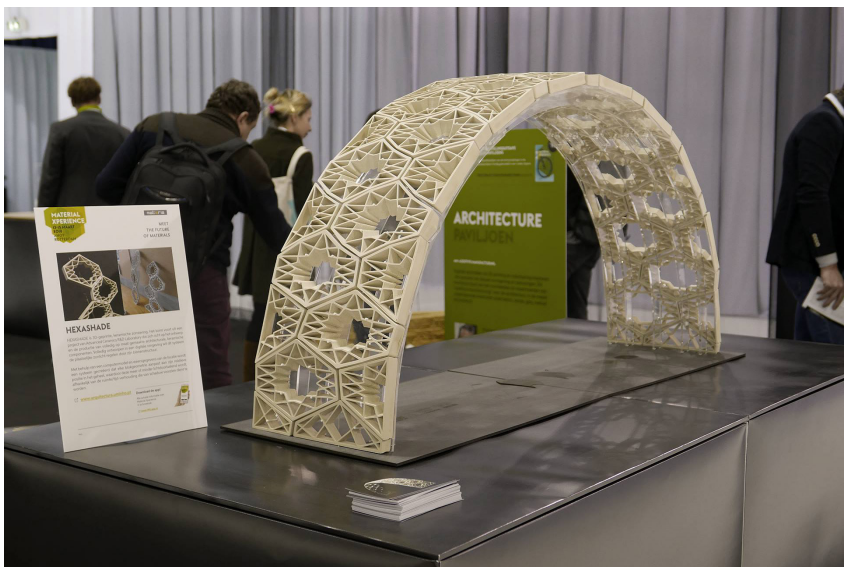


**Figura 2.27.** Mashrabiya moderna, Rashid Al Zayani Mosque, Bahrain, Mustafa A-Hadi, 2018. Retirado do site: [www.mustafaphoto.com](http://www.mustafaphoto.com)

**Figura 2.28.** Wave Wall, Aclab, 2016.  
Retirado do site: [www.aclab-idegui.org](http://www.aclab-idegui.org)

**Figura 2.29.** Odin Wall, Aclab, 2016.  
Retirado do site: [www.aclab-idegui.org](http://www.aclab-idegui.org)

**Figura 2.30.** Hexashade, João Carvalho, 2018.  
Retirado do site: [www.aclab-idegui.org](http://www.aclab-idegui.org)

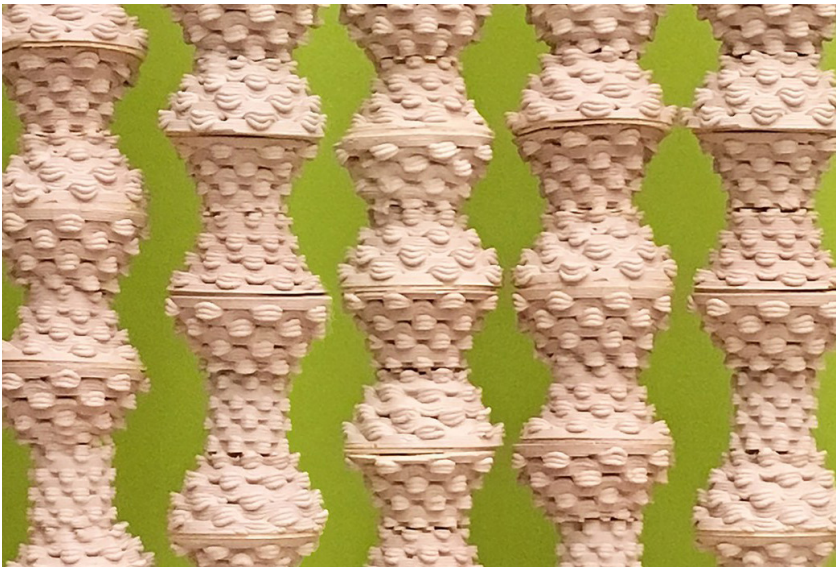






**Figura 2.31.** Polybrick Wall, Cooper Hewitt Design Museum and Sabin Design Lab, 2016. retirado do site: [www.jennysabin.com](http://www.jennysabin.com)

**Figura 2.32.** Mashrabiya 2.0 uses 3-D printed ceramic disks that cover a pipe to ventilate a building, International Masonry Institute, 2014. Retirado do site: [www.ceramics.org](http://www.ceramics.org)









### 3. O papel e a celulose

A indústria do papel, ao percorrer, através dos séculos, o mundo, experimenta de contínuo novos progressos (Melo, 1926). A procura por novos meios de comunicação entre diferentes culturas externa e internamente, motivou o aparecimento de novas formas de comunicação, para a expressão de palavras, ações ou imagens, como as pinturas rupestres, onde o principal objetivo era a cominação das ações para gerações futuras, aquando de grandes êxitos, conquistas e costumes, através da impregnação de imagens, letras ou palavras, em paredes ou pedras, com tintas ou escavamento do próprio material. Os hieróglifos, de origem egípcia, foram uma nova forma de interpretar a comunicação entre culturas, através da ostentação, onde o desenho de formas humanas, era utilizado para demonstrar o físico e beleza do imperador, ou símbolos e frases para confortar o túmulo da alma que iria lá habitar.

Entre diversos anos, a folha de papel e a folha de pergaminho, disputaram pelo pódio, mas a relação de preço e acessibilidade, fez com que a produção do papel aumenta-se, conquistando todas as civilizações por onde passava, o pergaminho começa a ter um uso restrito, atendendo ainda ao preço do mercado (Melo, 1926), passando a ser um material somente para pessoas de famílias nobres.

*“Em Portugal, este material teve um grande impacto, conquistando o coração dos portugueses. Relativamente à história da indústria papeleira em Portugal neste período, sabe-se da existência de várias concessões para montagem de moinhos e privilégios para transporte de trapos”*(Melo, 1926).

Foi a 29 de Abril de 1411, que se fez erguer, no rio Liz, o primeiro moinho dedicado à produção do papel amando de Gonçalo Lourenço. Em Alenquer, D. Sebastião também concedeu privilégios a Manuel Teixeira, para que este construísse moendas para fabricação de papel. E esta procura pela produção de papel estendeu-se ao longo de Portugal até chegar ao norte, Vizela, onde se fundou uma fábrica junto ao rio. Em Paramos, junto à cidade de Braga, diz Severim de Faria, nas suas Notícias de Portugal, existiu no tempo de D. João V uma fábrica de papel pardo (Melo, 1926).



## 3.1. A produção do papel



**Esquema 3.01.** Esquema exponenciando o valor da fibra virgem para a produção da celulose e do papel, tendo em conta as suas fases de transformação.

O ciclo de vida do papel, inicia-se muito antes da transformação da matéria-prima no produto final, sendo que esta provem da árvore. Produzido de diversas formas, estas foram evoluindo e ganhando forma com o passar dos anos, tendo-se em questão os fatores da gestão dos recursos renováveis, a sustentabilidade e a posterior reciclagem, podendo o papel passar pelo processo de transformação cinco vezes ao longo da sua vida. Estes temas são essenciais para aplicação da produção do papel, devido à defesa do ambiente e sua contínua preservação. São plantadas grandes áreas, em propriedades controladas, destinadas à indústria papeleira por forma a reduzir o impacto ambiental e aumentar a produtividade.

O esquema ao lado referenciado exponencia o valor da fibra virgem para a produção do papel, através da indústria papeleira, dando-se então uma utilização nova ao material transformado e respeitando o impacto ambiental. Este ciclo, destinado à produção do papel compreende cinco fases de execução:

- 1.Plantação de viveiros;
- 2.Recolha da madeira na floresta;
- 3.Produção da pasta;
- 4.Produção do papel;
- 5.Transformação e expedição.

A primeira fase (1)*Plantação de viveiros*, compreende a plantação de espécies arbóreas, como o Eucalipto Globulus, sendo esta a principal cultura destes. Estas propriedades, tem como objetivo promover o aumento da produtividade e a melhoria das características da madeira, com o menor custo e impacto ambiental, assegurando-se das necessidades das atividades florestais, através do desenvolvimento de materiais genéticos e práticas silvícolas, Figura 3.01.

A segunda fase (2)*Recolha da madeira na floresta*, compreende a recolha da madeira na floresta quando esta apresenta um crescimento necessário para a produção do papel, Figura 3.02. Estas madeiras recolhidas são transportadas até às indústrias papeleiras, onde existe uma receção da mesma. Após isso, estas são preparadas, onde os toros são previamente descascados e transformados em pequenos pedaços com dimensões controladas, dando origem a aparas, estilhas ou cavacas.

A terceira fase (3)*Produção da pasta*, é a fase de maior relevância a ser estudada, pois é aqui onde ocorre o processo de preparação da pasta, onde ocorre o cozimento da matéria-prima obtida anteriormente, por forma a que seja possível individualizar as fibras de celulose, ocorrendo a separação da lenhina, obtendo-se uma primeira pasta crua de cor castanha.

A lenhina é um composto orgânico com um poder calorífico elevado, que através da sua queima, potencia a produção de vapor e energia. Uma vez que esta foi expulsa da matéria-prima, a pasta crua de cor castanha, é posteriormente branqueada, com agentes oxidantes, para a produção do papel, sendo que o principal objetivo desta base é a eliminação da lenhina residual e os componentes que acompanham estas fibras de celulose. Nesta fase obtém-se então o primeiro material de estudo, enunciado no subcapítulo 3.3.*Pasta acabada de celulose em folha branca*.

Com isto, é nos possível obter dois tipos de pasta branca:

- Pasta seca em folhas, esta é seca para poder ser transportada, obtendo-se pasta acabada em folha branca;
- Pasta na forma de suspensão aquosa transferida através de condutas, esta é transferida para produção do papel.

A quarta fase (4)*Produção do papel*, dá-se a transformação da celulose para o produto final, o papel. A pasta obtida anteriormente sujeita a uma refinação que tem como objetivo aumentar as ligações inter-fibras, que mais tarde se adicionam cargas minerais e outros aditivos à pasta em suspensão, por forma a melhorar as propriedades de resistência do papel. Nesta fase obtém-se então o segundo material de estudo, enunciado no subcapítulo 3.3.*Pasta em pó branca*, onde ocorre uma secagem da pasta na forma de suspensão aquosa, Figura 3.03.

Para a produção do papel, a celulose em suspensão, é transformada numa folha contínua, por eliminação da água, pela ação combinada da gravidade e por sucção, onde uma folha de papel, passa a apresentar uma humidade de 80 a 85%. Após isso, dá-se a pré-secaria, através da extração de água a partir da compressão das folhas transformadas. Nesta etapa o papel passa por rolos de borracha, onde é aplicada uma solução de amido na sua superfície, ficando novamente húmido e sendo submetido novamente à pós-secaria. Esta dá-se pela evaporação da humidade por ação do calor. O papel fica seco e é recolhido no enrolador onde forma boninas de grandes dimensões, Figura 3.04.

Por último, a quinta fase (5)*Transformação e expedição*, ocorre a transformação das grandes bobinas de papel, em formas mais pequenas, as resmas de papel, contendo 500 folhas, Figura 3.05. Estas resmas são posteriormente embaladas e exportadas para diferentes locais e países, Figura 3.06.

**Figura 3.01.** Primeira fase, Plantação de viveiros, Ageflor, 2017. Fonte: [www.ageflor.com.br](http://www.ageflor.com.br)

**Figura 3.02.** Segunda fase, Recolha da madeira na floresta, Ageflor, 2017. Retirado do site: [www.ageflor.com.br](http://www.ageflor.com.br)

**Figura 3.03.** Terceira fase, Produção da pasta de papel, Ana Baião, 2013. Retirado do site: [www.expresso.sapo.pt](http://www.expresso.sapo.pt)



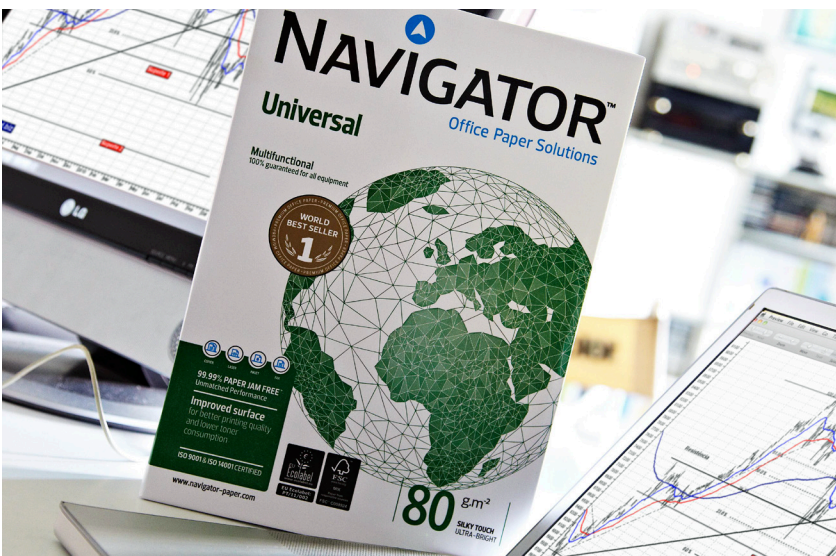




**Figura 3.04.** Quarta fase, Produção do papel, The Navigator Company, 2017. Retirado do site: [www.navigator.pt](http://www.navigator.pt)

**Figura 3.05.** Quinta fase, Transformação e expedição, desconhecido, 2018. Retirado do site: [www.dinheirovivo.pt](http://www.dinheirovivo.pt)

**Figura 3.06.** Produto final, The Navigator Company, 2017. Retirado do site: [www.navigator.pt](http://www.navigator.pt)





## 3.2. A celulose

*“Plants used for papermaking belong to the botanical division, called Spermatophyta (seed plants). Spermatophyta is divided into two subdivisions, Gymnospermae (naked seeds) and Angiospermae (seeds enclosed within a fruit). (...) In the pulp and paper industry coniferous trees are referred to as softwoods, and broadleaf trees as hardwoods” (Ilvessalo-Pfaffli, 1995).*

A celulose é um polímero abundante nas paredes das plantas. Para estudar estas fibras é necessário ter em atenção os princípios básicos da anatomia da madeira, a sua identificação de acordo com tipo de espécie em estudo. Cada tipo de madeira possui o seu tipo de fibras, tipos de células de madeira, que dão origem à polpa que mais tarde origina a produção do papel, como já referido no subcapítulo 3.1.A *produção do papel*. O tecido de madeira, composto pelas fibras, é formado através da divisão das células, dando-se o crescimento longitudinalmente, desde as pontas da copa até aos ramos e raízes.

Segundo Ilvessalo-Pfaffli (1995), todas as células de madeira apresentam funções específicas e estas podem ser divididas em três grupos: (a) as células condutoras, (b) as células de suporte e (c) as células de armazenamento. Tendo em conta o tipo de madeira em estudo, as células de condução e suporte podem funcionar como células axiais, onde em madeira de lei, as células condutoras são vasos e as células de suporte formam as fibras, já nas madeiras maciças, as traqueídes<sup>1</sup> executam as duas tarefas descritas, o que leva a que as células de condução e suporte sejam células mortas cujas suas cavidades se encontram saturadas de água e ar. As células de armazenamento, são células vivas, que potenciam o armazenamento e a distribuição de alimentos para que estas espécies permaneçam vivas.

A fibra em estudo - celulose - é um componente com elevado uso em diversos campos da sociedade, desde alimentação, até à fabricação de elementos arquitetónicos para construção. Este é um polímero, com cadeia longa, classificado como polissacarídeo ou carboidrato devido

1. As traqueídes, células do xilema, são células cilíndricas, alongadas e com numerosos poros, tanto nas paredes laterais, como nas apicais. A parede celular das traqueídes encontra-se reforçada por lignina, composto químico produzido apenas pelas plantas, que as torna impermeáveis e rígidas (Ilvessalo-Pfaffli, 1995).

à sua composição se basear num monómero. Esta é muito abundante na natureza, sendo o principal constituinte das paredes celulares das plantas. Este polímero tem como fórmula empírica:



*(6 moléculas de carbono, 10 moléculas de hidrogénio e 5 moléculas de oxigénio)*

Este polímero, só se produz devido à presença de moléculas de glicose aquando a sua hidrólise. Devido à presença de uma estrutura com características lineares e fibrosas, estas conseguem ganhar resistência e tornarem este material excepcional quando aplicado em diversos campos da sociedade. Devido à presença de ligações de hidrogénio, comportam-se excepcionalmente à água e tornam-se insolúveis às fibras compactas que constituem as paredes celulares das plantas.

### **3.2.1. Pasta acabada de celulose em folha branca**

A pasta acabada de celulose em folha branca, obtém-se como já referido anteriormente, pelo cozimento, por forma a que as fibras de celulose consigam individualizar-se, obtendo-se assim uma pasta crua de cor castanha. Esta pasta numa fase seguinte sofre um branqueamento através de agentes oxidantes, onde eliminam todos os resíduos ainda provenientes na mistura. Após cada etapa de branqueamento, as fibras de celulose conseguem adquirir uma cor cada vez mais neutra, que aquando o processo de branqueamento, a pasta branqueada é transformada em pasta seca, Figura 3.10, sendo submetida a processos de secagem para facilitar o seu transporte. É nesta etapa que se obtém as ditas folhas de pasta de celulose.

### **3.2.2. Pasta de celulose em pó branqueada**

A pasta de celulose em pó branqueada ou suspensão seca, dá-se de igual modo ao enunciado no subcapítulo anterior, sendo que quando se finaliza todo o processo de branqueamento, a pasta crua é branqueada, como se encontra em suspensão aquosa, é enviada através de tubagens fechadas, para a zona de produção do papel, onde sofre uma refinação que tem como objetivo aumentar as ligações das fibras, podendo então dar origem a dois materiais, Figura 3.11:

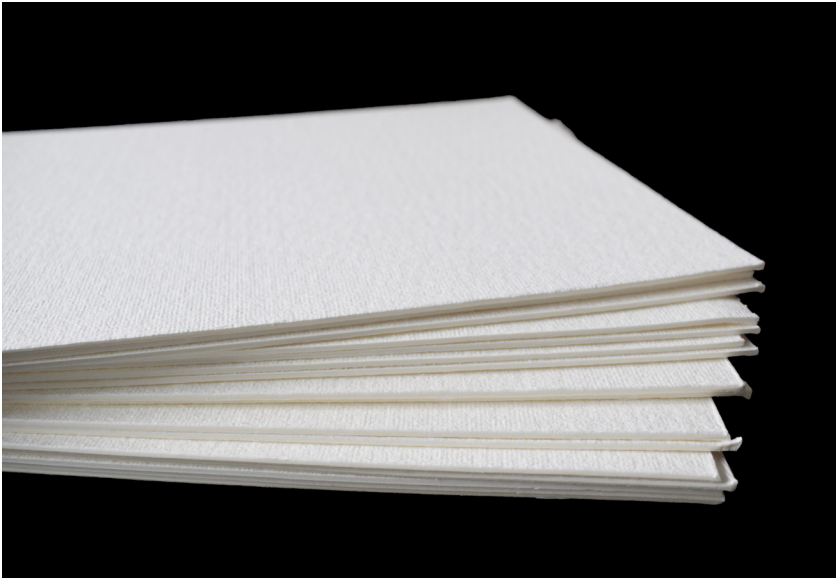
- 1.O papel, onde a pasta húmida é transformada numa folha continua;
- 2.A pasta em pó branca, onde a pasta húmida é seca através de mecanismos apropriados, dando origem à celulose em pó.

**Figura 3.07.** Fibras de madeira crua, Exopixel, 2014. Retirada do site: [www.depositphotos.com](http://www.depositphotos.com)

**Figura 3.08.** Pasta acabada de celulose em folha branqueada húmida, antes da secagem e transformação.

**Figura 3.09.** Pasta acabada de celulose em folha branqueada seca, antes da secagem e transformação.





**Figura 3.10.** Pasta acabada de celulose em folha branqueada, após a secagem para transporte.

**Figura 3.11.** Pasta de celulose em pó branqueada, após a secagem.



## 3.3. A aplicação do papel

### 3.3.1. Materiais de construção em arquitetura

Desde à muitos anos que se procuram soluções económicas e versáteis a serem aplicadas na indústria da construção e arquitetura, e de facto o papel é um material económico e versátil. A utilização do papel ainda possui muito para descobrir, o que provoca aos seus utilizadores sérias dúvidas, mas como comprovado até à atualidade, o seu emprego é totalmente possível.

São diversos os usos atuais do papel, sendo aplicados para fabricação de isolamentos e tratamento acústico, Figura 3.13, revestimentos, moldes, como os aglomerados de madeira ou o gesso cartonado, Figura 3.12. A aplicação do papel no campo da construção, provoca um aumento de resistência a forças aplicadas e diminuição dos pesos nos produtos obtidos, o que conseqüentemente irá contribuir para construções mais económicas, vindouras e resistentes.

No campo das colas, o papel também já é utilizado para originar um laminado melamínico, composto por folhas kraft e resinas, conferindo no mercado um produto com elevada plasticidade, resistência e durabilidade. Também compósitos cimentícios passam a englobar na sua constituição celulose o que permite massas muito mais reforçadas e duráveis. Lacas ou vernizes à base de celulose são produtos especiais usados em móveis para dar um acabamento mais vindouro. A sua utilização é um pouco desagradável e a sua disponibilidade no mercado é escassa.

Além do seu emprego na construção, este também é muito utilizado para decoração, o papel de parede, onde se cobrem paredes inteiras com diferentes texturas e cores, Figura 3.14. De facto, o papel pode originar diferentes coisas, assumindo sempre um papel de matéria-prima, para fabricação de estruturas como divisórias, enchimento de blocos e cofragem.





**Figura 3.12.** Utilização de placas de gesso cartonado, para revestimento de paredes, criação de tetos falsos ou paredes, desconhecido.

Retirado do site: [www.duplafor.com.br](http://www.duplafor.com.br)

**Figura 3.13.** Projeção de fibras de celulose sobre a parede para isolamento térmico e acústico, Epicentro, desconhecido. Retirado do site: [www.grupoepicentro.com](http://www.grupoepicentro.com)

**Figura 3.14.** Utilização de folhas de papel para revestimento de paredes e afins, desconhecido. Retirado do site: [www.bemcolar.com](http://www.bemcolar.com)



### **3.3.2. Outros campos de aplicação**

O papel é mais do que um material de suporte de escrita e impressão. Há todo um conjunto de setores em que o papel pode ser utilizado e certamente que muitos outros serão inventados (Lopes, 2010). Um dos objetivos desta investigação, passa por contribuir com novos setores de implementação do papel. Para responder às necessidades da sociedade, o papel passou a ter um elevado peso em diversas áreas, podendo ser utilizado para produzir embalagens, materiais de higiene e limpeza, alimentação, vestuário, calçado e decoração, artigos para o lar e lazer.

#### **Embalagens**

As embalagens, podem ser simples folhas de embrulhos, ou um invólucro fabricado com considerável quantidade de trabalho, como verificado no capítulo 2. *Enquadramento*, onde a sua transformação e fabricação em série, requer o uso de mecanismos apropriados e operadores experientes, para responder às necessidades do mercado. Com apenas dois séculos, sofreu uma elevada expansão para ser utilizada na origem e acompanhamento do produto, desde a sua produção, como os alimentos, medicamentos, brinquedos e tantos outros artigos, Figura 3.15. Hoje a embalagem movimenta equipas de design, marketing, engenharia e até de psicologia, para atender não apenas às atuais necessidades concretas de armazenamento e transporte de produtos, mas também aos desejos mais recônditos do homem, gerados pela cultura do consumismo, e até para o seduzir e induzir ao gasto (Lopes, 2010). Tudo se embala atualmente, até as próprias embalagens embaladas são embaladas.

#### **Materiais de higiene e limpeza**

A utilização do papel para produção de produtos de higiene e de limpeza, é um campo com elevado peso na sociedade atual e a sua aplicação na economia pública e privada, como serviços públicos, estabelecimentos, hospitais, restaurante e as nossas casas, cada vez é mais procurada, de acordo com as diversas opções de escolha apresentadas pelos comerciantes. De facto, a sociedade atual é uma grande consumista de papel, desde guardanapos, toalhetes, toalhas de mesa e marquesa, rolos multiusos, fraldas, resguardos, batas, toucas, lenços, sapatos, protetores vários, entre outros, Figura 3.17. Nos diversos grupos implementados na sociedade, dificilmente não se verá estes produtos e as quantidades excessivas destes artigos fabricados em papel, se não forem devidamente reciclados, contribuem para a poluição mundial.

#### **Alimentação**

A aplicação do papel na alimentação é um tema interessante a ser explorado, devido à dificuldade do ser humano em digerir celulose. Mas esta aplicação do papel na alimentação engloba as suas embalagens de produtos, assim como a incorporação do mesmo nos alimentos, Figura 3.16. São esses as salsichas, os salames, linguiças, queijos revestidos com papel fabricado a partir de celulose solúvel. Esta aplicação, já se encontra muito mais avançada, que somente a aplicação nos seus revestimentos, este passa a ser também um componente alimentar, o que provoca um



melhoramento ao nível da qualidade dos alimentos e as suas condições de preservação. Como referido no capítulo 2. *Enquadramento*, esta aplicação encontra-se a ser desenvolvida por investigadores, com o interesse de diminuir a fome mundial, nomeadamente nos países carenciados.

### **Vestuário e calçado**

No vestuário e no calçado também se utiliza o papel (Lopes, 2010). A fabricação do vestuário na nossa atual sociedade é diferente do que ocorria na sociedade antiga. Antigamente compravam-se tecidos a metro e recorria-se ao modista ou costureiro para a fabricação das peças de vestuário, atualmente essa condição é impossível, dado à sociedade consumista e os hábitos atuais. Qualquer produto confeccionado a partir de um determinado produto ou tecido por si só já confeccionado, tem na sua constituição uma percentagem de viscosa, que para baixo custo deste, não se trata de algodão, linho ou lã. Esta fibra muitas da vezes é feita a partir das mesmas fibras presentes nas folhas de papel, o que permite fabricar um maior número do mesmo produto, a um baixo custo. Para venda em série e a baixo custo, as peças de vestuário não possuem fibras naturais, mas sim fibras sintéticas, o que permite baixar o preço e aumentar o consumo do papel, potenciando a poluição e geração de doenças, como reações alérgicas para quem as usa. O mesmo acontece nos sapatos, utilizando fibras celulósicas, para fabricação de solas até às palmilhas, aos forros, aos atacadores e às partes mais bonitas que embelezam o produto.

### **Decoração, artigos para o lar e lazer**

Como nos materiais de higiene e limpeza, a presença do papel na decoração é bastante notório. Facilmente reparamos na presença de revestimentos de parede num espaço, ou a presença de cortinados, os candeeiros, os revestimentos dos sofás, as tolhas de mesa, as flores e os diversos enfeites, até as caixas e recipientes, Figura 3.18. A fabricação de mesas, sofás e outras peças de mobiliário, que muitas das vezes são apelativos e apresentam um custo de mercado baixo, com colas e revestimentos impermeabilizantes, conseguem ter um comportamento vindowo, passando a assumir diferentes formas e levezas. De facto, o IKEA, é o principal concorrente do mercado ao nível do mobiliário, devido ao custo e durabilidade dos materiais e cada vez mais a sociedade opta por decorações mais baratas, para recorrer ao seu modelamento futuro quando esta passa a estar fora de moda, ou quando o artigo se encontra danificado, pois o custo do produto assim o permite, e cada vez mais, os mobiliários de elevada qualidade vão passar a estar somente nas famílias mais nobres. O papel cada vez mais vai estar presente na sociedade, nos brinquedos, nos livros e variados objetos.

**Figura 3.15.** Utilização da celulose para fabricação de caixas e outros artigos, desconhecido.

**Figura 3.16.** Utilização da celulose para geração de armazenamento para alimentos, Elite embalagens, desconhecido.

Retirado do site: [www.eliteembalagens.com.br](http://www.eliteembalagens.com.br)

**Figura 3.17.** Utilização da celulose para fabricação de artigos médicos, desconhecido.

**Figura 3.18.** Utilização da celulose na decoração, artigos para o lar e lazer, desconhecido.





## 4. Materiais e testes de extrusão

*“The tradition of using paper in architecture dates back to ancient China and Japan. The earliest examples of paper partitions in the form of folding screens produced in china back to the eighth century AD. (...) In the 1980s, a new era of paper architecture began. It was the Japanese architect Shigeru Ban who had the greatest impact on the promotion of paper as a building material” (Latka, 2017).*

Atualmente a tecnologia e a exploração de materiais inovadores, expande o modo como a celulose pode ser integrada na arquitetura contemporânea. A celulose é um dos material mais valiosos e o principal componente das plantas utilizadas para a produção de papel. A extração de celulose no seu estado fibroso é o processo básico para a produção de uma polpa. Esta obtém-se por meio de processos mecânicos, quimio-mecânicos, semi-químicos e químicos (Latka, 2017). O presente capítulo pretende analisar a possibilidade de utilização de misturas à base de celulose para o processo de fabrico aditivo. Estas misturas aplicadas no fabrico aditivo, foram desenvolvidas tendo como base de estudo diversos testes de extrusão para aferir a trabalhabilidade de cada uma delas. Visto que o comportamento entre diferentes materiais diverge, todas as misturas foram devidamente testadas e catalogadas e posteriormente estudadas aquelas que melhor resultados apresentaram.

Para compreender quais os parâmetros aplicados para o estudo dos diferentes materiais e testes de extrusão, o presente capítulo foi dividido-se em dois módulos. Um primeiro dedicado à exploração de misturas à base de celulose e amido, referindo quais as misturas inicialmente propostas e aquelas que se manifestaram com maior intensidade. Um segundo dedicado à exploração de misturas à base de celulose a argila. A argila, por ser um material que já foi devidamente estudado e onde é conhecido o seu comportamento, a anexação da celulose veio demonstrar que este quando anexado a outro material pode tornar-se mais resistente.



## 4.1. Introdução

O presente subcapítulo tem como objetivo sintetizar o conhecimento adquirido sobre as diferentes técnicas de fabrico aditivo, enunciadas no subcapítulo 2.1. *Tipos de Fabrico Aditivo* e utilizar aquela que melhor se adapta para a execução deste trabalho. Esta tarefa inicia-se pela observação do tipo de pasta executada e o equipamento disponível para a execução desta investigação. Das seis técnicas enunciadas que compõem os três grupos definidos, processos de ligação, processos de deposição e processos de modelação, a mais propícia à utilização das misturas realizadas é a **extrusão**, processo semelhante ao Liquid Deposition Modeling (LDM), nome adotado pelo fabricante italiano das impressoras Delta 3D Wasp. Este processo baseia-se num sistema pneumático no qual uma bomba faz pressão sobre o material, até à sua extrusão, atingindo níveis de precisão semelhantes às extrusoras de polímeros plásticos. Esta técnica tem sido utilizada para a impressão de misturas à base de madeira, como enunciado no artigo *Liquid Deposition Modeling: a promising Approach for 3D printing of wood*, pelos autores Michael Rosenthal, Clara Henneberger, Anna Gutkes e Claus-Thomas Bues, da Universidade Técnica de Dresden, Tharandt, Alemanha.

Para a validação desta investigação, houve a colaboração do ACLab, Laboratório de Cerâmica Avançada (Advanced Ceramics R&D Lab) e dos recursos aí existentes. Para a impressão de um modelo, os equipamentos são de fácil usabilidade, na medida em que existem três servomotores que controlam as diversas coordenadas, X, Y e Z e um outro conectado ao fuso. Este em conjugação com a pressão do ar, consegue extrudir a pasta de celulose ou argila através de pontas com diversas dimensões. Também presente uma estufa Memmert e um forno Salford EB160.

Visando a impressão com argila, as características para a produção de elementos com pasta de celulose são semelhantes, diferindo somente na quantidade de pressão de ar exercida sobre o cartucho. Devido da fluidez da pasta de celulose, propõem-se que a pressão do ar exercida no cartucho seja  $\frac{1}{4}$  da quantidade necessária num cartucho de pasta de cerâmica do tipo GRES 130 MP, com um teor de humidade de 33%.

Para a fabricação dos diversos modelos, de acordo com o tipo de fabrico adotado, é necessária a geração de um código de controlo numérico (G-Code). Este código contém todas as instruções para a

produção do modelo, desde a velocidade da cabeça de impressão, à velocidade da rotação do fuso, para extrusão da quantidade exata de material. Neste trabalho recorreu-se à utilização do programa de modelação 3D, Rhinocerus, e de uma Application Programming Interface<sup>1</sup> (API), o Grasshopper, auxiliar à definição dos modelos paramétricos para a geração de objetos e componentes arquitetónicos.

A Lutum<sup>®</sup>Mini apresenta uma área de impressão limitada, com cerca de 450mm em cada direção, X, Y e Z, já a Lutum<sup>®</sup>V4 apresenta uma área de impressão de 430mm por 460mm e em Z 800mm.

Realizada a impressão dos modelos, em celulose ou argila, o processo de fabrico diverge, os modelos de celulose necessitam de uma boa secagem em estufa, já os modelos em argila podem secar em estufa ou não, mas para garantir uma resistência elevada necessitam de serem cozidas. A secagem dos elementos em papel devem ser bem realizada, caso contrário estes começam a ganhar bolor, pois a temperatura ambiente não é suficiente para uma boa secagem.

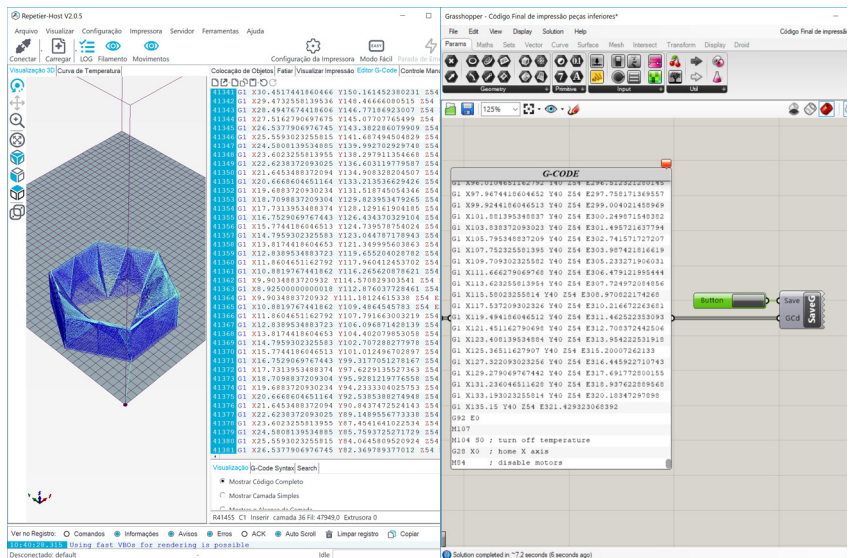
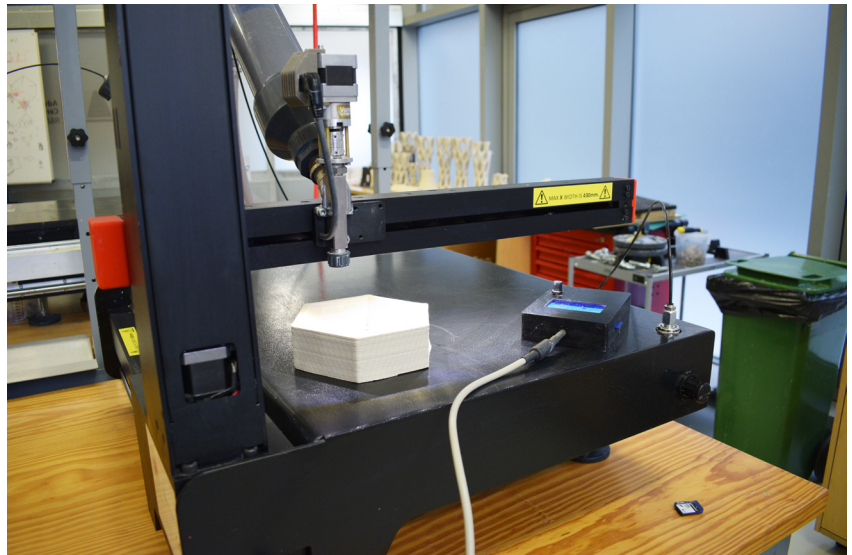
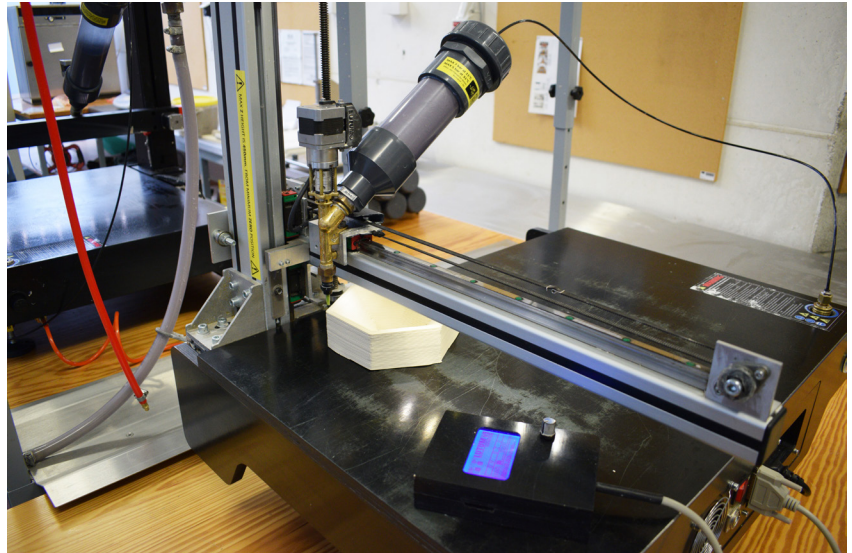
1. Uma API (Application programming interface) é um conjunto de padrões presentes num determinado software para utilização das suas diferentes funcionalidades, acessíveis somente para programação, que permite utilizar as características desse mesmo software de uma forma menos evidente. Em suma, os autores desenvolvem um determinado programa, fornecendo uma API específica para que outros utilizadores criem *plug-ins*, estendendo as suas funcionalidades. (Retirado do site: [www.infoworld.com](http://www.infoworld.com))



Figura 4.01. Impressora 3D Lutum®Mini.

Figura 4.02. Impressora 4.0 Lutum®.

Figura 4.03. Geração do G-Code em Repetier e Grasshopper.





**Figura 4.04.** Estufa Memmert, utilizada para aceleração da secagem dos modelos.

**Figura 4.05.** Forno Salfor EB160, utilizado para cozimento das peças cerâmicas.



## 4.2. A celulose e o amido

Como já referido anteriormente no presente capítulo 4. *Materiais e testes de extrusão*, este divide-se ao longo de dois módulos de estudo, sendo este subcapítulo o primeiro módulo enunciado referente ao estudo das misturas à base de celulose e amido.

*“A celulose é a principal fibra estrutural do reino vegetal e segundo (Klemm et al, 2005) a celulose é o polímero orgânico mais comum e é considerado uma fonte quase inesgotável, para a crescente demanda de produtos ecologicamente corretos e biocompatíveis” (Latka, 2017).*

Este subcapítulo visa a demonstração do conhecimento relativo às diferentes misturas geradas, através das possíveis combinações apresentadas no subcapítulo seguinte 4.2.1. *Estudos prévios* e posterior descrição dos materiais utilizados. Para cada uma destas misturas, foram realizados testes de extrusão iniciais, onde se testava a fluidez do material quando extrudido pela ponta de uma seringa. Se este obtivesse um comportamento excelente, então essa mistura passaria a ser estudada com um maior rigor e segundo parâmetros definidos. Nem todas elas apresentaram o comportamento desejado daí este subcapítulo se centrar maioritariamente no estudo das misturas à base de celulose e amido. A ideia era gerar uma mistura que pudesse facilmente ser aplicada no FA segundo a técnica descrita anteriormente, extrusão da pasta no subcapítulo 2.1. *Tipos de fabrico aditivo*.

Os testes de extrusão realizados individualmente para cada mistura a seguir estudada, tem como objetivo testar e validar a mistura para fabrico e prototipagem rápida, nomeadamente para a produção de componentes arquitetónicos, biodegradáveis, ecológicos e com baixo custo de produção. Cada uma delas foi estudada segundo uma base de trabalho, dividindo-se em quatro fases de estudo, a descrição da mistura e propriedades da pasta, a impressão desta aquando a produção de testes, a secagem, tendo especial atenção à retração e deformações verificadas e o acabamento, com o estudo da textura, cor, granulometria e peso.



## 4.2.1. Estudos prévios



**Figura 4.06.** Possibilidade de conjugação das diferentes misturas calculadas.

Para validar a escolha das misturas a seguir enunciadas, recorreu-se a um conjunto de múltiplas combinações, com o objetivo de desenvolver uma pasta que apresenta-se potencialidades para aplicação no FA, quando combinada com celulose em folha ou pó. Iniciou-se esta investigação pela busca de materiais inovadores que pudessem facilmente ser combinados à celulose, formando uma pasta fluida propícia para extrusão. Neste contexto consideram-se materiais inovadores o recurso a alguns materiais como a acetona, o amido, o serrim, a cola branca e o Ágar-Ágar, que normalmente não são utilizados para a produção e fabrico de componentes arquitetónicos. Sendo a celulose uma matéria-prima com teor de humidade nulo, era importante ter em conta que todos os materiais fossem líquidos ou viscosos para funcionarem como elemento de ligação entre os grãos ou pó desta.

Tendo como restrição a mistura de outros materiais em pó, elaborou-se um esquema, onde se demonstra a possibilidade de conjugação das diversas pastas testadas. Todas as misturas são repetidas utilizando celulose em folha e celulose em pó. Definiu-se que cada mistura deveria conter um material base, um material viscoso e/ou um material sólido. Nem todos os materiais se comportam de igual forma, independentemente de demonstrarem as características pretendidas. As misturas definidas são enunciadas na lista abaixo.

- Mistura 1**\_Celulose em folha e Ágar-Ágar
- Mistura 2**\_Celulose em pó e Ágar-Ágar
- Mistura 3**\_Celulose em folha e Acetona
- Mistura 4**\_Celulose em pó e Acetona
- Mistura 5**\_Celulose em folha e Cola branca
- Mistura 6**\_Celulose em pó e Cola branca
- Mistura 7**\_Celulose em folha e Amido
- Mistura 8**\_Celulose em pó e Amido
- Mistura 9**\_Celulose em folha, Amido e Serrim
- Mistura 10**\_Celulose em pó, Amido e Serrim

Aquelas que demonstraram melhor comportamento foram estudadas conforme exposto nos subcapítulos seguintes.



**Mistura A**\_Celulose em folha e Amido

**Mistura B**\_Celulose em pó e Amido

**Mistura B.1**\_Celulose em pó, Amido e Serrim

A mistura 1 e 2, celulose em folha ou pó e Ágar-Ágar, não apresentou um comportamento interessante a ser aplicado na fabricação de elementos a partir da técnica escolhida para realizar esta investigação científica. O Ágar-Ágar é um material que quando anexado com água forma uma mistura muito líquida, esta quando arrefecida inicia a sua transformação de um estado líquido para um estado mais sólido e gelatinoso, comportamento muito diferente daquele verificado aquando a transformação do amido. Esta mistura ao ser extrudida através de um bico de extrusão, pelo estado que o Ágar-Ágar apresenta quando ainda quente, é transferido primeiramente, fazendo com que os grãos de celulose deixem de se encontra saturados com a solução. Esta mistura é interessante para aplicação e geração de peças a partir de moldes. Ao combinar ambos os materiais, estes ao serem prensados mantem as suas características e depois de secos apresentam uma resistência elevada.

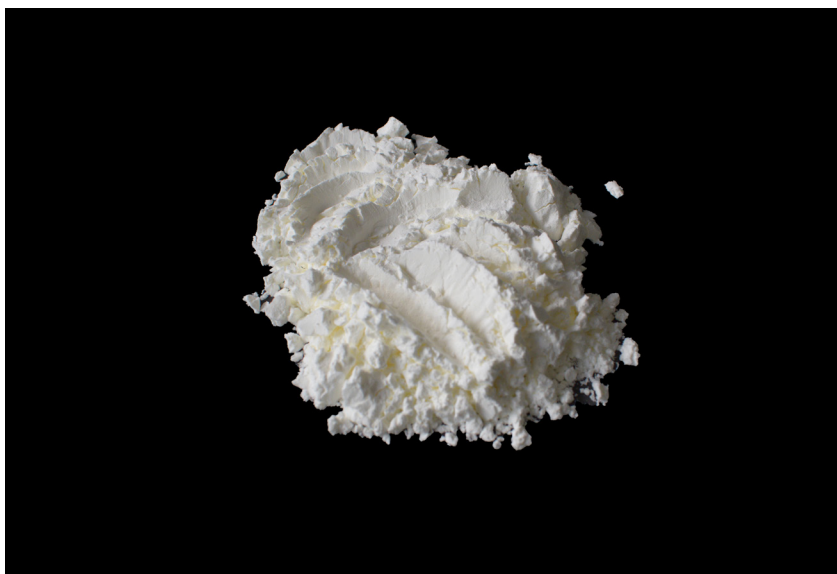
A mistura 3 e 4, celulose em folha ou pó e acetona, não apresentou um comportamento interessante a ser aplicado na fabricação de elementos a partir da técnica escolhida. Esta mistura tem potencialidades para aplicação no FA, utilizando outra técnica de prototipagem rápida. Tal como no Ágar-Ágar, a acetona por se encontrar no estado líquido, quando anexado à celulose inicia o seu processo de evaporação rápida, como observado no artigo *“MIT 3D prints plant materials with antibacterial properties”*, investigação enunciada no subcapítulo *2.1.Fabrico aditivo com celulose*. Este fenómeno deve-se por esta ser um líquido volátil, não necessitando de ser aquecida como a água para iniciar a sua evaporação. Este processo dá-se porque as ligações das moléculas rompem-se com grande facilidade, devido ao seu baixo ponto de ebulição. Quando se inicia a extrusão da pasta, muitos grãos de celulose já se encontram secos e duros pela inexistência de acetona e outra é rapidamente extrudida como acontece com o Ágar-Ágar, fazendo com que a celulose seja pressionada no cartucho e não consiga passar através do fuso.

A mistura 5 e 6, celulose em folha ou pó e cola branca, apresentou um comportamento interessante a ser aplicado na fabricação de elementos a partir da técnica escolhida para realizar esta investigação científica, quando anexada celulose em pó. Devido à presença de água nos grãos de celulose em folha, esta altera as propriedades da cola branca diminuindo a sua resistência. Esta mistura foi posta de parte devido à trabalhabilidade observada com o amido, este conseguiu demonstrar um comportamento superior à cola branca. Também foi considerada a viabilidade da cola branca quando em contacto com os componentes da impressora 3D, daí a sua anexação como estudo prévio e não mistura final.

**Figura 4.07.** Demonstração do material em estudo, o Amido.

**Figura 4.08.** Demonstração do material em estudo, o Ágar-Ágar.

**Figura 4.09.** Demonstração do material em estudo, o Serrim.







## 4.2.2. Preparação do Amido

O amido é um carboidrato presente nas plantas, quando entra em contacto com água este dissolve-se e se posteriormente fervido, consegue transformar-se num material gelatinoso, conferindo plasticidade à mistura quando acoplado a outro material. Geralmente é utilizado na alimentação para gerar cremosidade e transformar molhos. A sua mudança de estado líquido para gelatinoso é a sua maior vantagem enquanto material para aplicação em FA, pois confere uma forte ligação entre as múltiplas partículas de celulose. Para a transformação do material é necessário 50 gramas de amido a 350 gramas de água quente ou fria.

- 1) Pesa-se 350 gramas de água quente ou fria para num recipiente, Figura 4.10;
- 2) À água pesada acrescenta-se 50 gramas de amido e mexe-se bem até que esta resulte numa mistura homogénea, Figura 4.11;
- 3) Posteriormente coloca-se a mistura em lume brando e vai-se mexendo até que este comece a borbulhar e transformar-se, Figura 4.12;
- 4) O amido está transformado, quando toda a mistura presente na panela se encontrar no estado gelatinoso, Figura 4.14.

Esta preparação requer alguns cuidados, no seu tempo de transformação para que não perca as suas características, quer na pesagem dos materiais, de forma a que a gramagem de amido anexada esteja em conformidade com a quantidade de água presente. Quando a quantidade de amido é inferior à solicitada, esta não conseguirá sofrer transformação, para isso anexa-se a quantidade em falta se esta ainda estiver numa fase inicial. Quando esta já se encontra numa fase mais avançada, a anexação de amido será em vão pois este não se vai misturar ao anexado anteriormente, Figura 4.14.

A razão desta mistura deveu-se a variados testes realizados, onde se utilizava a mesma quantidade de água, fazendo variar a quantidade de amido misturado e de facto, para 350 gramas de água, 50 gramas de amido são suficientes para que consiga transformar, sendo que se a quantidade de amido for superior a 50 gramas, a transformação realiza-se de igual forma, sendo que o material passa a ser utilizado em excesso, não havendo rentabilização do mesmo.



**Figura 4.10.** Pesagem de 350gr de água (quente ou fria).



**Figura 4.11.** Colocação de 50gr de amido à água previamente pesada.



**Figura 4.12.** Mistura dos dois componentes após pesagem e posterior aquecimento.

**Figura 4.13.** Transformação da mistura, passagem do estado líquido a gelatinoso.

**Figura 4.14.** Colocação de amido após a transformação da mistura, impossibilidade de mistura entre amido seco e amido transformado.





## 4.2.3. Mistura A



**Figura 4.15.** Demonstração do material em estudo, o Amido.



**Figura 4.16.** Pasta acabada de celulose em folha branqueada.

Composta por amido e pasta de celulose em folha branca, esta foi a primeira mistura a ser pensada e aquela que mais campos de investigação potenciou para a concretização das seguintes. Como já referido no subcapítulo 3.2.1. *Pasta acabada de celulose em folha*, esta matéria-prima necessita de se transformar antes da sua anexação a outros materiais. A pasta de celulose em folha transformada foi cedida pela The Navigator Company<sup>1</sup> e pelo RAIZ – Instituto de investigação da Floresta e Papel. A sua preparação é relativamente simples, sendo somente necessário transformar o amido e celulose, como enunciado no subcapítulo 4.2.2. *Preparação do Amido* e 3.2.1. *Pasta acabada de celulose em folha*. Geradas estas transformações a sua união transforma múltiplos materiais numa mistura compósita. Para gerar a mistura A, é necessário seguir somente três passos diversos.

- 1.A pesagem de 350gr de pasta de celulose em folha branca húmida;
- 2.Pesagem de 150gr de amido previamente fervido;
- 3.Agregação de ambos os materiais, até obtenção de uma mistura homogénea.

Por se tratar da primeira mistura testada neste trabalho, a descoberta de um processo de manipulação da celulose foi o que mais trabalho originou. Esta matéria-prima quando utilizada para a fabricação podia ser implementada na mistura, húmida – os grãos de celulose possuem uma percentagem de água – ou seca – os grãos de celulose encontram-se isentos de água. Para comprovar qual a melhor forma de utilização da pasta de celulose em folha transformada, foram realizados dois testes. No primeiro caso, foi utilizada pasta de celulose em folha transformada húmida ao amido, se esta continha uma elevada percentagem de água então a mistura deixava de ter o comportamento pretendido, o que originada misturas mais líquidas, o inverso também acontecia. No segundo

1. A The Navigator Company é uma empresa portuguesa que se dedica ao fabrico e comercialização de papel em Portugal. É proprietário de grande parte da floresta e mundialmente conhecido pelos seus produtos, dedicando-se ao fabrico de variados tipos de papel. A sua missão centra-se na globalidade e reconhecimento por transformar, de forma inovadora e sustentável, a floresta em produtos e serviços que contribuam para o bem estar das pessoas. (Retirado do site: [www.thenavigatorcompany.com](http://www.thenavigatorcompany.com)) O RAIZ é um centro de investigação que funciona em parceria com a The Navigator Company. Este instituto tem como o objetivo o reconhecimento a nível mundial, como centro de investigação de referência, promovendo o desenvolvimento sustentável, a sua missão é contribuir para a competitividade e sustentabilidade da floresta.



caso, quando anexados grãos de celulose transformados secos, era extremamente difícil a manipulação da mistura pois os grãos absorviam a água presente no amido, eliminando toda plasticidade da mistura, o que levava à anexação posterior de uma percentagem de água. O segredo da mistura passava por controlar o teor de humidade inerente nos grãos de celulose. Com isto, pode-se comprovar que a celulose para ser manipulada necessita de conter uma pequena percentagem de água, para que os grãos de celulose transformados consigam trabalhar corretamente quando anexado o amido. O segundo aspeto a ter em conta foi a percentagem de água que a celulose húmida deveria conter para que esta apresenta-se uma trabalhabilidade excelente, realizando-se múltiplos testes e provetes, extrudindo pasta com o uso de uma seringa, processo semelhante ao observado seguidamente. Em diversos recipientes, colocou-se celulose transformada seca, anexou-se diversas percentagens de água e introduziu-se a mesma quantidade de amido em cada uma, até se obter a razão acima mencionada. A utilização de celulose seca garantiu que cada mistura apresenta-se um teor de humidade nulo, garantindo assim resultados exatos.

No ato de transformação da pasta de celulose em folha é extremamente difícil garantir uma homogeneidade no seu tamanho, com isto pensa-se que devido à diversidade granulométrica dos grãos de celulose, a impressão e produção de componentes arquitetónicos possa ser reduzida. A presença de água faz com que a mistura apresente um peso bruto acima do esperado, pois quanto maiores forem os grãos de celulose, maior é o teor de humidade presente em cada um.

Esta mistura apresenta comportamentos diferentes quando no seu estado cru, após impressão e estado final, após secagem, como observado na tabela abaixo apresentada.

	<b>Cru</b>	<b>Secagem</b>
<b>Retração</b>	-	Destacamento
<b>Humidade</b>	87 wt%	0 wt%
<b>Cor</b>	Branca	Branca
<b>Absorção de água</b>	Saturação dos grãos	Saturação dos grãos
<b>Resistência</b>	Nula	Elevada

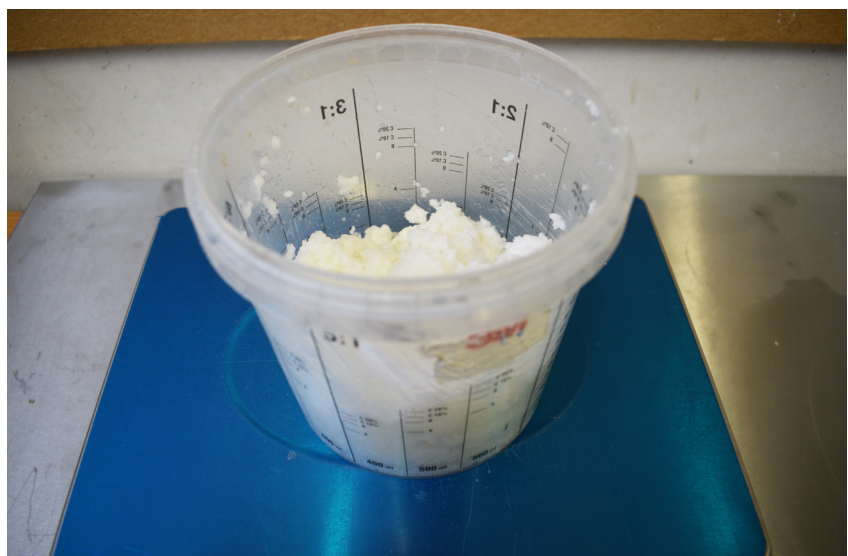
**Tabela 4.01.** Propriedades inerentes à mistura A, aquando a sua utilização e após secagem dos objetos produzidos.



**Figura 4.17.** Pesagem de 350gr de celulose em folha transformada.

**Figura 4.18.** Pesagem de 150gr de amido fervido.

**Figura 4.19.** Homogenização da mistura A, celulose em folha transformada e amido fervido.

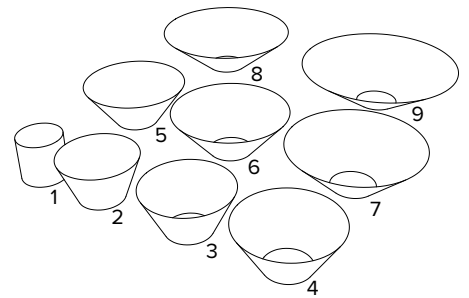


## Impressão

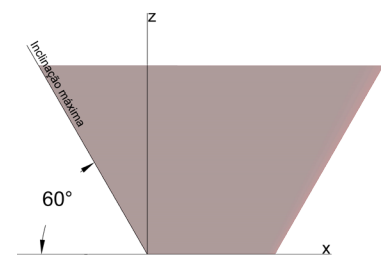
Gerada a mistura e explorada a preparação e utilização da pasta de celulose em folha, para validar a exequibilidade desta, foi necessário selecionar um conjunto de parâmetros para serem explorados no ato de impressão. Estes parâmetros dividem-se em dois núcleos, a validação da mistura para aplicação no FA e a sua trabalhabilidade para a composição de elementos arquitetónicos. Para responder a ambos os parâmetros definidos foram realizados dois testes, um inicial respondendo ao primeiro objetivo traçado e um posterior respondendo ao segundo.

Para se validar a utilização da mistura no fabrico aditivo, recorreu-se a um teste simples, que consistia na impressão de pequenos círculos, com um diâmetro de 5cm. Nos diversos objetos, como verificado na Figura 4.22, foram testados diferentes parâmetros, variação na pressão do ar, diferenciação de fluidez e diâmetros dos bicos de extrusão. Observando os objetos produzidos, é possível concluir que todos eles apresentam comportamentos, dimensões e espessuras de camadas diferentes. Sempre que a pressão de ar era elevada no ato de impressão, a pasta era extrudida com uma velocidade elevada, fazendo com que a base aumentasse a sua espessura pela deposição continua do material. Este facto era fortemente influenciado pela fluidez excessiva do material, o que com uma pressão elevada, o fuso quando passava a desenhar uma nova camada e parava para realizar o movimento de um ponto final de camada para o ponto inicial da outra, não conseguia parar a continua extrusão do material, fazendo com que a deposição continua em altura das diversas camadas fosse impossível de realizar. Quando a pressão de ar aplicada no cartucho era baixa, o desenho dos pequenos círculos era muito mais cuidado, e a possibilidade de deposição de camadas era possível de realizar. Este fator era verificado sempre que a fluidez do material apresenta-se um teor de humidade relativamente baixo. Sempre que utilizadas misturas com fluidez relativamente baixa, uma vez que a granulometria dos grãos de celulose não era homogénea, fazendo que com alguns dos grãos apresentassem dimensões superiores ao diâmetro do bico de extrusão e por não apresentar uma ligação com o amido, estes grãos com dimensões superiores muitas das vezes dificultavam o fabrico das peças, por se encontrarem duros e num estado sólido, provocando o entupimento do fuso o que consequentemente provocava defeito nas peças produzidas. Em suma, se a mistura A apresenta uma fluidez elevada, então a fabricação dos objetos é dificultada, se esta apresenta pouca fluidez, raramente se obtém uma impressão limpa e finalizada, sendo que foi necessário um termo intermédio, entre os diferentes parâmetros estudados.

Para avaliar a trabalhabilidade tendo em conta os resultados anteriormente observados, para aplicação e produção de elementos arquitetónicos e após solucionada qual a melhor mistura a ser utilizada, foi necessário testar o seu comportamento quando aplicado para a fabricação



**Figura 4.20.** Modelos para estudo da limitação para curvatura da mistura, desenho vetorial. (1) cilindro, (2) cone truncado com 20° de curvatura, (3) cone truncado com 25° de curvatura, (4) cone truncado com 30° de curvatura, (5) cone truncado com 35° de curvatura, (6) cone truncado com 40° de curvatura, (7) cone truncado com 45° de curvatura e por fim, (8) cone truncado com 50° de curvatura



**Figura 4.21.** Esquema demonstrativo da inclinação mínima pretendida para a fabricação das peças, nomeadamente para as misturas à base de celulose em folha transformada, mistura A. Cone truncado com 30° de curvatura máxima, esquema 4, Figura 4.20.

de componentes com graus de complexidade superiores aos cilindros. Para testar tal parâmetro, foi desenvolvido um conjunto de modelos com diversas inclinações, por forma a testar as limitações de curvatura que a mistura consegue suportar, como observado na Figura 4.20. Os modelos impressos foram: (1) cilindro, (2) cone truncado com 20° de curvatura, (3) cone truncado com 25° de curvatura, (4) cone truncado com 30° de curvatura, (5) cone truncado com 35° de curvatura, (6) cone truncado com 40° de curvatura, (7) cone truncado com 45° de curvatura e por fim, (8) cone truncado com 50° de curvatura — ver anexo 1. De acordo com a Figura 4.23, a fabricação dos modelos levantou alguns desafios, pelo constante entupimento do bico de extrusão. Foi possível comprovar que a mistura A consegue suportar inclinações até 30°, após isso os modelos começam a deformar-se, como observado na Figura 4.21. Esta experiência foi bem sucedida porque permitiu aferir que a mistura não permite a extrusão de modelos com determinadas inclinações, originando objetos com pouca qualidade, textura tosca. Se a impressão consistir em formas simples e alturas relativamente baixas, esta mistura consegue responder bem.

Com isto, pode-se concluir que a mistura A não apresenta um comportamento e trabalhabilidade para ser aplicada na produção de elementos arquitetónicos no FA.

## Secagem

A secagem é a fase que sucede a impressão e é definida pela desidratação das peças fabricadas, podendo resultar na alteração da sua configuração formal inicial. Todas as peças produzidas com a mistura A, aquando o ato da secagem, demonstraram complicações reduzidas quando comparadas aos testes produzidos com pasta de cerâmica, argila GRES 130 MP, isto porque para se obter uma boa cura do material, estas necessitam de recorrer a uma secagem artificial, num ambiente controlado com temperaturas superiores a 30°C. Este fator é de elevada relevância porque a presença de amido – um polissacarídeo produzido pelas plantas verdes – desencadeia um processo de decomposição nas peças. O contrário acontece quando sujeitas a ambientes controlados. Quando os modelos impressos são colocados na estufa, a temperaturas constantes e elevadas, a secagem do material dá-se facilmente o que permite que a água presente nos grãos de celulose evaporem, fazendo com que o amido funcione como elo de ligação. Quanto maior é a temperatura a que estão sujeitos, maior é a rapidez de secagem. Se esta não for bem realizada, o mesmo se vai verificar com o enunciado na secagem natural, pois a peça ao não se encontrar bem curada, esta iniciará um processo de decomposição, até que a peça fique sem utilidade, pelo florescimento de bactérias e fungos.

A retração observada após a secagem completa, é uma reação relevante a analisar. Nesta mistura verifica-se exatamente o comportamento oposto do que habitualmente se observa com os modelos produzidos com pasta cerâmica, nas misturas à base de celulose o índice de retratibilidade é nulo, mantendo as dimensões inicialmente definidas no modelo digital. Pela presença de água aquando a extrusão da pasta esta evapora e provoca uma diminuição da altura das peças. Verifica-se ainda uma deformação ligeira das paredes do modelo provocada pela diminuição do volume das camadas, isto é da retração do material. Poder-se-á afirmar que este efeito ocorre pelos seguintes fatores: (1) à sobreposição das diferentes camadas, ou o peso destas, faz com que as primeiras camadas, ou camadas inferiores achatem, aumentando a espessura da camada; (2) na secagem, após o achatamento das primeiras camadas, a diminuição de volume é superior nas camadas superiores, que nas camadas inferiores, uma vez que a quantidade de material colocado é superior na base, pelo fator enunciado anteriormente. Como esta pasta é pesada e densa não se dá a laminação ou destacamento das camadas, fator enunciado nas subseqüentes misturas em análise. Ao contrário da cerâmica, as pastas à base de celulose não apresentam fissurações, mas são notórias as suas deformações. Quanto mais fina e alta for a parede do modelo, maior é a deformação observada.



**Figura 4.22.** Impressão do primeiro teste realizado para comprovação da mistura A.



**Figura 4.23.** Secagem dos objetos produzidos com a mistura A

**Figura 4.24.** Observação da textura após a secagem do primeiro teste realizado.



## Acabamento

Produzida a mistura, validada a sua trabalhabilidade e aplicação no fabrico aditivo de objetos, o acabamento é a fase de menor relevância para o estudo individual de cada mistura, mas não deixa de possuir uma certa importância. É nesta fase de trabalho que se observa a qualidade de impressão dos objetos produzidos, a textura criada pela união dos diversos materiais escolhidos, o seu peso e tonalidade. De facto, o acabamento permite observar claramente o objeto produzido e analisá-lo, avaliando os erros executados e planificando estratégias futuras para a resolução destes.

A textura produzida pela mistura A no ato de impressão não é homogénea, isto porque a granulometria dos seus grãos diverge. Este fator influencia fortemente a textura final das peças produzidas, bem como variações de aplicação de ar. Com o aumento da pressão de ar – e quanto maior é a pressão de ar – o resultado final é mais irregular ou tosco, descuidado.

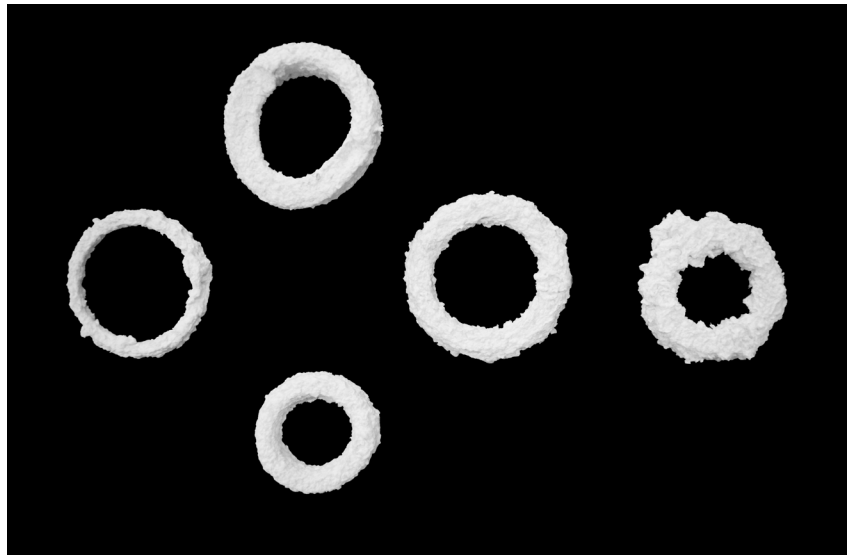
Quanto à tonalidade, independentemente da presença do amido o seu tom branqueado mantém-se, após desenvolvidos os teste e posteriormente analisados.

O peso é fortemente influenciado pela quantidade de pasta de celulose em folha utilizada e a água presente na mistura, quanto maior for a granulometria dos grãos transformados, mais pesada é a peça e vice-versa. De facto, a mistura devido à sua força e resistência, tendo em conta as suas fragilidades de impressão pode funcionar bem como malhas de resistência.

**Figura 4.25.** Acabamento dos círculos produzidos para a geração do primeiro teste de estudo.

**Figura 4.26.** Acabamento dos círculos produzidos para a geração do primeiro teste de estudo. Variação da textura, granulometria, dependendo do bico de extrusão utilizado.

**Figura 4.27.** Acabamento do conjunto de modelos com diversas inclinações, testar a limitação da curvatura da mistura.







## 4.2.4. Mistura B



**Figura 4.28.** Demonstração do material em estudo, o Amido.



**Figura 4.29.** Pasta de celulose em pó branqueada.

Composta por amido e pasta de celulose em pó branqueada, esta mistura foi o caso de estudo que mais contribuiu para o desenvolvimento desta investigação. Para gerar a mistura B, é necessário seguir somente três passos diversos.

- 1.A pesagem de 60gr de pasta de celulose em pó branqueada;
- 2.Pesagem de 300gr de amido previamente fervido;
- 3.Agregação de ambos os materiais, até obtenção de uma mistura homogénea.

Após a observação da mistura A, concluiu-se que a celulose teria um comportamento excelente, se esta se encontrasse sobre a forma de um pó, que quando anexado ao amido formasse uma polpa homogénea. Quando estudada a mistura A, os maiores problemas encontrados durante a sua utilização para FA, estava relacionado com a forma final desta, se os grãos de celulose estivessem saturados de água, a fluidez da pasta era excessiva, se os grãos estivessem secos, geravam problemas no ato de impressão levando ao entupimento do bico, o peso deste também era um forte influenciador negativo aquando a produção de um modelo pois devido ao seu peso, ao peso da água e do amido, a sobreposição entre camadas era extremamente difícil. A pasta de celulose em pó foi cedida pelo RAIZ<sup>1</sup> – Instituto de investigação da Floresta e Papel – com o intuito de utilizar um material sustentável e biodegradável. Todos os problemas verificados anteriormente com a utilização da pasta de celulose em folha transformada, foram resolvidos pela simples anexação de pó em vez de grãos à mistura. Uma vez que esta não necessita de sofrer transformações como a pasta de celulose em folha, é possível garantir sempre uma homogeneidade entre os grãos de celulose.

Se comparado com o observado na concretização da mistura A, esta quando aplicada na fabricação de objetos ou modelos, consegue ter um comportamento, uma fluidez e trabalhabilidade excelente. Para que isto fosse possível, antes da sua utilização para a fabricação de modelos, foi

1. O RAIZ (Instituto de Investigação da Floresta e do Papel) é um centro de investigação privado, sem fins lucrativos, reconhecido com entidade do Sistema Científico e Tecnológico Nacional e com Centro de Interface – Centro de Valorização e Transferência de Tecnologia. (Retirado do site: [www.raiz-iifp.pt](http://www.raiz-iifp.pt)). Este instituto tem como o objetivo o reconhecimento a nível mundial, como centro de investigação de referência, promovendo o desenvolvimento sustentável, a sua missão é contribuir para a competitividade e sustentabilidade da floresta.

necessário realizar um conjunto de testes, onde sobre a mesma quantidade de celulose em pó, se adicionava variadas percentagens de amido, até se obter uma mistura que cumprisse os parâmetros exigidos anteriormente. Iniciou-se o estudo desta pela execução de diversos provetes, onde sobre a mesma quantidade de celulose, 60gr de celulose em pó branqueada, se fez variar a percentagem de amido anexado, (1) 100gr de amido fervido, (2) 150gr de amido fervido, (3) 200gr de amido fervido, (4) 250gr de amido fervido, (5) 300gr de amido fervido, (6) 350gr de amido fervido, (7) 400gr de amido fervido e por fim, (8) 450gr de amido fervido. Ao longo dos 5 primeiros testes, o amido era insuficiente para banhar toda a pasta de celulose em pó, já nos dois últimos, a quantidade de amido presente na mistura era excessivo. Com isto, conclui-se que a quantidade de amido anexado à mistura, com 60gr de celulose deve rondar os 300gr a 350gr sendo que o ideal será 300gr. Para que a mistura possua a fluidez correta, esta deve banhar todos os grãos de celulose e quando a sua agregação, a pasta não pode apresentar níveis de plasticidade elevados, esta deve formar uma massa, que quando moldada não pode colar quando estabelecer contacto com objetos, igual à plasticina.

Tendo em conta as suas propriedades, é possível discernir que o comportamento obtido no ato de impressão é completamente distinto ao verificado no ato de secagem, como observado na tabela abaixo.

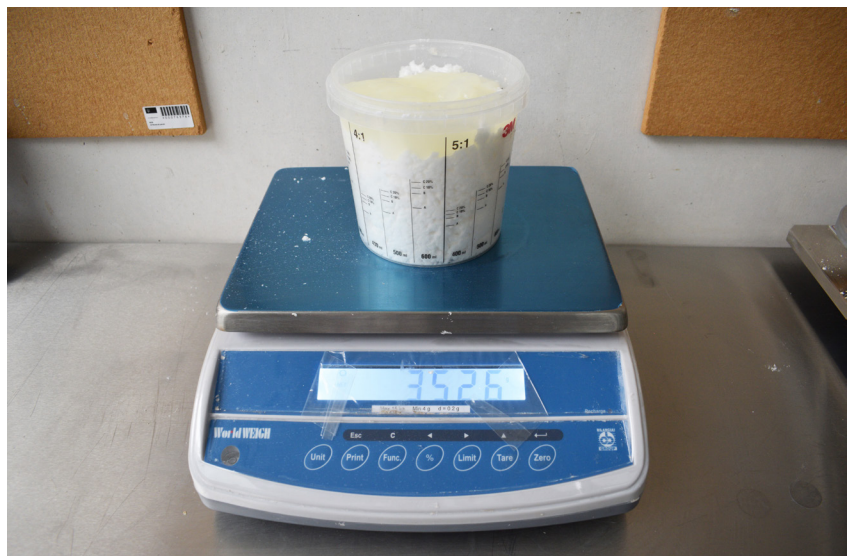
	<b>Cru</b>	<b>Secagem</b>
<b>Retração</b>	-	Destacamento
<b>Humidade</b>	85 wt%	0 wt%
<b>Cor</b>	Branca	Branca
<b>Absorção de água</b>	Saturação dos grãos	Saturação dos grãos
<b>Resistência</b>	Nula	Elevada

**Tabela 4.02.** Propriedades inerentes à mistura B, aquando a sua utilização e após secagem dos objetos produzidos.

**Figura 4.30.** Pesagem de 60gr de celulose em pó.

**Figura 4.31.** Pesagem de 300gr de amido fervedo.

**Figura 4.32.** Homogenização da mistura B, celulose em pó e amido fervedo.



## Impressão

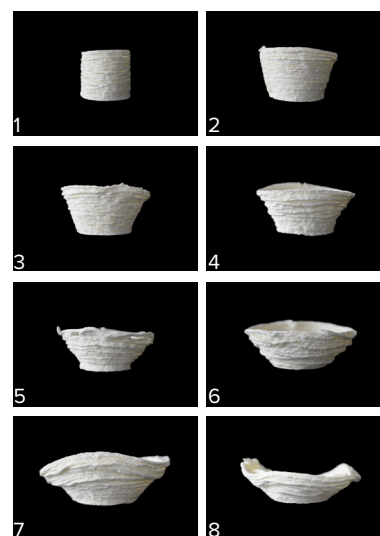
Gerada a mistura B, para se iniciar a validação da pasta, foram traçados diferentes parâmetros de estudo, anteriormente mencionados, aquando do estudo individual da mistura A. Este estudo divide-se em duas fases de trabalho, uma primeira ligada à validação da mistura e posterior aplicação para fabricação de componentes arquitetónicos e uma segunda fase ligada à observação do comportamento desta quando aplicada em contextos reais de fabricação de elementos arquitetónicos e formas mais complexas.

A primeira fase de trabalho divide-se ao longo de dois parâmetros de estudo, a validação da mistura, exequibilidade e trabalhabilidade. Para validar a mistura tendo em conta a sua trabalhabilidade e exequibilidade, realizou-se um primeiro teste que consistia na fabricação de três peças simples, um cilindro e dois cones truncados com uma inclinação de 35°, Figura 4.37. Os resultados obtidos aquando a realização deste teste foram superiores ao esperado. Visando os resultados obtidos, uma vez verificada a trabalhabilidade da mistura B, realizou-se um segundo teste, tal como na mistura A - pasta de celulose transformada e amido - que consistia na fabricação de um conjunto de modelos, onde se fazia variar a inclinação das paredes com o propósito de se observar qual a limitação máxima de curvatura da mistura. De acordo com a Figura 4.33 e 4.38, esta conseguiu responder bem ao exercício traçado, obtendo-se uma resposta de trabalhabilidade superior ao observado na mistura A. De acordo com os provetes realizadas, a mistura B tem uma resposta excelente a partir de uma inclinação de 40°, como observado na Figura 4.34, sendo que esta inicia um processo de deformação quando as inclinações são inferiores ao limite máximo traçado no esquema, inferior a 40° — ver anexo 2.

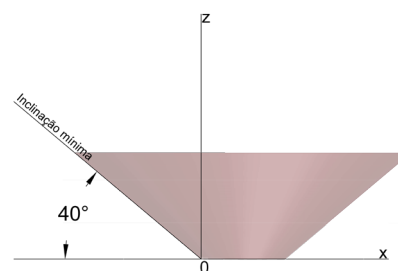
Uma vez que os parâmetros de estudo lançados acima foram realizados com sucesso passou-se à segunda fase de estudo. Esta divide-se em dois parâmetros de estudo, o desenvolvimento de modelos orgânicos e formas mais complexas e a posterior produção de um componente arquitetónico, o bloco Alveolus. Com a validação da curvatura máxima permitida pela mistura B, realizou-se um terceiro teste que consistia na fabricação de modelos simples e orgânicos, onde se testava a flexibilidade de curvatura das peças. As peças AM Aalto<sup>1</sup>, Figura 4.35, tomam como base da taça do Arquiteto Alvar Aalto<sup>2</sup>. Ao longo deste teste foram estudados dois fatores, a produção de modelos com paredes simples ou duplas e a produção de modelos com espessuras de parede de 0,3mm

1. As peças AM Aalto, foram desenhadas tendo em conta o desenho base do arquiteto Alvar Aalto quando desenhou as suas taças. Estas taças são produzidas e vendidas para diversos fins.

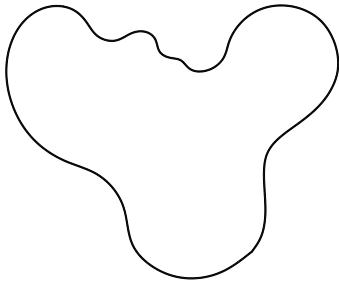
2. Hugo Alvar Henrik Aalto foi um arquiteto finlandês, cuja sua obra é considerada exemplar da vertente orgânica da arquitetura moderna. Estudou arquitetura em meados de 1916 a 1921 e depois de licenciado percorreu a Europa, adquirindo conhecimentos e experiência com vários arquitetos. Fundou o seu próprio atelier e a 1928 tornou-se membro do CIAM. É notável como designer de mobiliário, tecidos, taças, entre outros. Possui uma longa lista de obras, das quais metade foram construídas. (Gossel e Leuthauser, 2005)



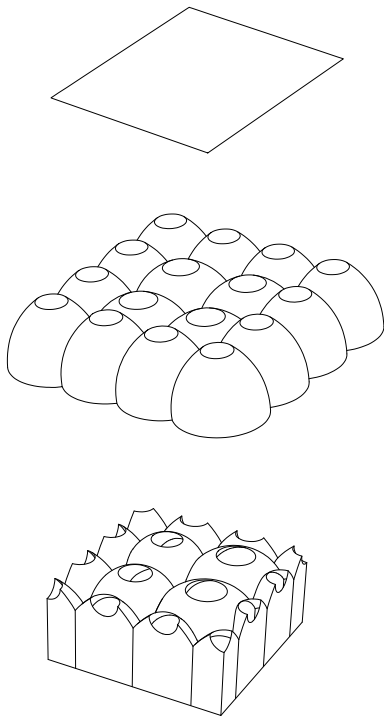
**Figura 4.33.** Primeira fase de trabalho, provetes produzidos com a mistura B. (1) cilindro, (2) cone truncado com 20° de curvatura, (3) cone truncado com 25° de curvatura, (4) cone truncado com 30° de curvatura, (5) cone truncado com 35° de curvatura, (6) cone truncado com 40° de curvatura, (7) cone truncado com 45° de curvatura e por fim, (8) cone truncado com 50° de curvatura.



**Figura 4.34.** Esquema demonstrativo da inclinação mínima pretendida para a fabricação das peças, nomeadamente para as misturas à base de celulose em pó, mistura B. Cone truncado com 40° de curvatura máxima, esquema 8, Figura 4.33.



**Figura 4.35.** Peças AM Aalto, desenho vetorial.



**Figura 4.36.** Alveolus Block, desenho vetorial.

ou 10mm. Com isto, foram produzidos três modelos, um primeiro que consistia na impressão de uma parede dupla com um bico de extrusão de 0,3mm, um segundo modelo com parede simples e bico de 0,3mm e por fim, um modelo com parede simples e bico de 10mm. A mistura B conseguiu responder bem aos objetivos traçados, independentemente do bico de extrusão ou espessura da parede, Figura 4.39.

Observado o excelente desempenho de resposta da mistura B e sendo um dos objetivos a estudar a fabricação de um componente arquitetônico, o bloco Alveolus, realizou-se este último teste com um grau de exigência superior aos traçados anteriormente. O bloco Alveolus<sup>3</sup> é um modelo com base regular e múltiplas aberturas cônicas onde a sua união origina um modelo único, Figura 4.36. A sua impressão permitiu retirar múltiplas conclusões não observadas aquando a fabricação dos testes anteriores, isto pela presença de paredes altas, paredes curvas e superfícies cônicas. A resposta da mistura B foi inferior aos objetivos traçados. A impressão foi excelente sendo que a maior desvantagem encontrada aquando a utilização da mistura B foi o excessivo desperdício da pasta, derivado da fluidez, que durante a passagem de um ponto final para outro inicial de camada, o fuso deixa de extrudir, mas a pressão do ar continua a exercer força sobre a mistura e a expulsar o material continuamente. Este fator causa um elevado desperdício quanto maior for o trajeto realizado entre as diferentes camadas o que provoca um acabamento sujo à peça. Quando maior é a percentagem de amido presente na mistura maior é o fator de desperdício. Para validar corretamente a retração da mistura, após a secagem, foram extrudidos cilindros de pasta e marcados devidamente com 10cm de comprimento, para que aquando a sua secagem, fosse possível retirar conclusões acerca do índice de retração do mesmo, Figura 4.42.

3. O modelo Alveolus, foi desenvolvido no âmbito de um trabalho lançado na unidade curricular de Formas e Técnicas Digitais, pelas autoras Tatiana Campos e Elsa Gonçalves, tendo como modelo de referência um projeto dos investigadores Emerging Object. Os modelos foram pensados para originar uma parede à base de blocos simples e quadrados onde se faz uma variação de múltiplos cones truncados. Os cones exteriores foram cortados com o objetivo de ao serem anexados a outros blocos originam novos cones truncados completos.

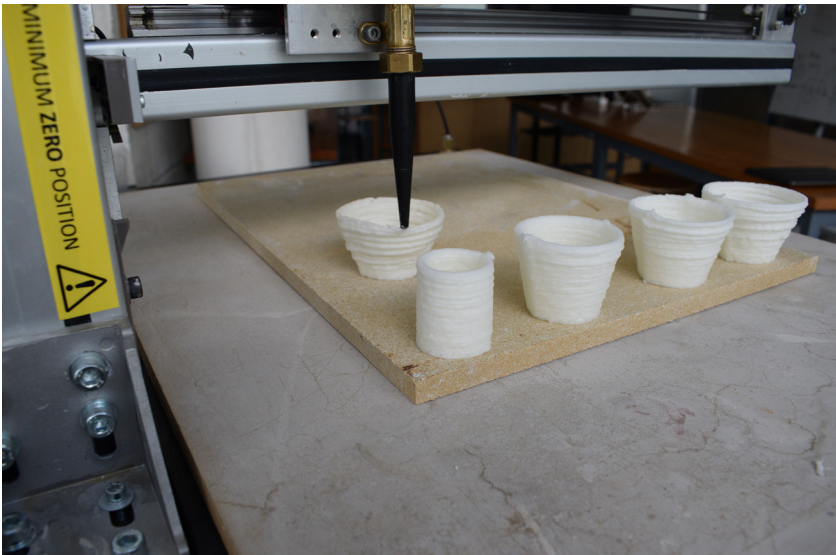




**Figura 4.37.** Primeiro teste de impressão, cilindro e dois cones truncados. Observação do comportamento da mistura B.

**Figura 4.38.** Segundo teste de impressão, estudo da limitação da curvatura máxima permitida pela mistura B.

**Figura 4.39.** Impressão das peças AM Aalto. Peça fabricada com parede simples e bico de extrusão de 3mm.

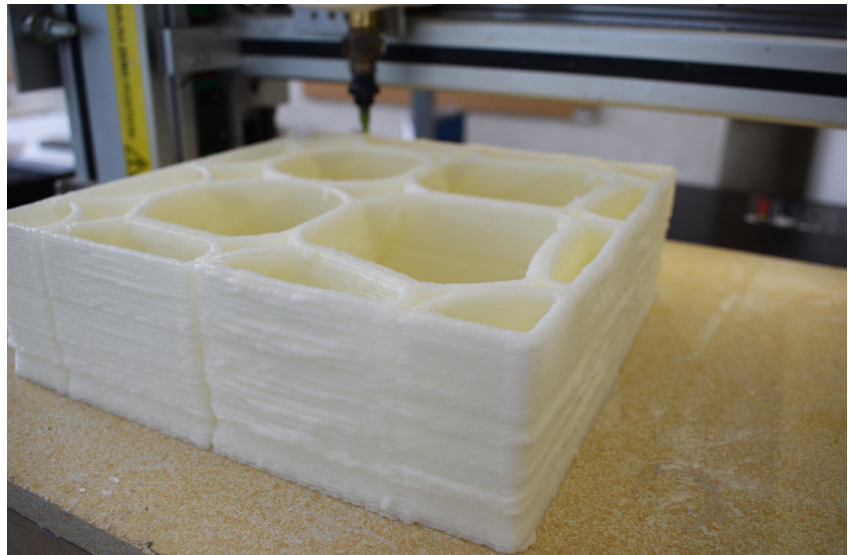
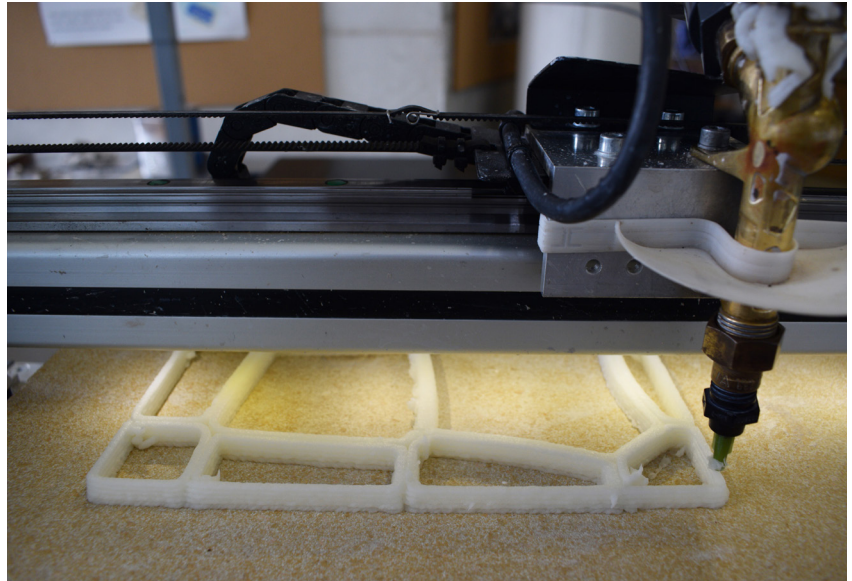




**Figura 4.40.** Fabricação do bloco Alveolus, com a mistura B. Impressão por módulos, originando paredes simples exteriores e paredes duplas interiores.

**Figura 4.41.** Fabricação das paredes do bloco Alveolus. Impressão cuidada e limpa.

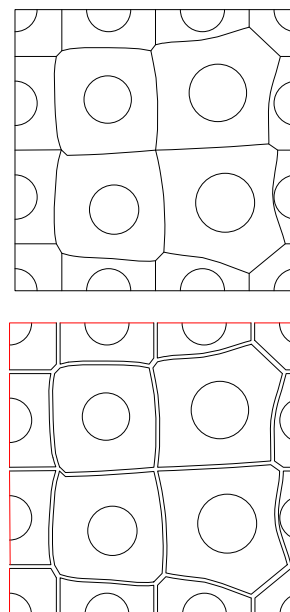
**Figura 4.42.** Extrusão de material da mistura B, para estudo da retração, delimitação de um comprimento no ato de impressão para observação da posterior retração dada a secagem.



## Secagem

A secagem é a fase com maior relevância ao longo do estudo individual das diferentes misturas e é definida pela desidratação das peças fabricadas com o material de estudo. Tendo como base de estudo a mistura A, para a secagem dos modelos fabricados com a mistura B foram realizados dois tipos de secagem, uma referente à secagem natural e outra num ambiente controlado. De facto, o resultado obtido aquando a concretização de ambas as secagens foi semelhante ao observado com a mistura A, se estas forem sujeitas a temperaturas ambientais variáveis, como as temperaturas nunca atingem dos 30°C, no inverno principalmente, as peças iniciam um estado de deterioração devido à presença do amido, um polissacarídeo presente nas paredes internas das plantas. De igual forma ao observado na mistura A, optou-se por recorrer a uma secagem artificial. Para se obter uma boa cura do material estas necessitam de recorrer a uma secagem artificial, num ambiente controlado com temperaturas superiores a 30°C. A secagem destas deve ser realizada num intervalo de 36 a 48 horas garantido a eliminação total da água e aumentando a sua resistência. Quanto mais lento é o processo de secagem, maior é a facilidade de controlo sobre o acabamento da peça. Quando esta permanece num ambiente controlado a baixas temperaturas, a laminação e destacamento entre as diversas camadas é controlado e de certa forma reduzido, este fator é provocado pela retração do material. A laminação deve-se sobretudo à presença da água aquando a manipulação da mistura B e da utilização no ato de impressão, que depois da secagem dá-se a evaporação da água presente no amido e celulose, levando a uma retração de volume das diferentes camadas.

Quase todos os testes realizados e enunciados no subcapítulo 4.2.4.1. *Impressão*, mostraram respostas excelentes, nomeadamente ao nível da retração e deformação aquando sujeitas a uma secagem artificial em estufa, exceto a produção das peças AM Aalto e do bloco Alveolus. As peças AM Aalto, demonstraram algumas consequências de secagem, nomeadamente a laminação entre as diferentes camadas. Para se evitar tal fator, pensou-se em diminuir a quantidade de amido presente na mistura e o aumentar da espessura, de 0,3mm para 10mm, ou o número de paredes, duplas ou triplas que constituem o objeto fabricado. No blocos Alveolus por apresentarem paredes simples e com bico de extrusão reduzido, a laminação deu-se com maior intensidade, como observado na Figura 4.46. Muito antes de concluída a secagem do bloco, como observado na Figura 4.45, a laminação era pronunciada, isto demonstra claramente que um dos principais problemas associados à laminação é a excessiva presença de água na mistura. Pela observação da Figura 4.46, foi possível concluir que dada a secagem completa do objeto, a presença da laminação destaca-se com maior intensidade nas paredes mais frágeis, neste caso, as paredes exteriores que envolvem o objeto. Observadas as paredes interiores e pela divisão do bloco em múltiplos módulos, Figura 4.43, estas possuem uma maior resistência e



**Figura 4.43.** Divisão do bloco Alveolus em múltiplos módulos para impressão. Esquema superior diz respeito ao objeto final, esquema inferior diz respeito à sua preparação para impressão.

força por se tratarem de paredes duplas. Este fator não só é verificado nas paredes retas, como também nas superfícies cónicas que constituem o objeto, por estas possuírem um menor contacto que as paredes retas, a laminação é intensificada nestes. Uma vez que a deposição de material de uma superfície curva, nunca estabelece um contacto total ocupando toda a área utilizada pela camada abaixo desenhada, estas possuem um maior ponto de contenção quando evaporada a água. Derivado da retração do material também se dá a fissuração ou rotura de ligação entre as diferentes camadas, em especial nas juntas e uniões de módulos, Figura 4.46. A deformação é outro ponto de colisão entre a mistura e sua secagem, dado que este mais uma vez é potenciado pela evaporação da água presente na mistura. De igual forma ao observado aquando a impressão das peças AM Aalto, quanto menor é a espessura atribuída à parede em estudo, maior será a sua deformação isto porque devido à laminação, não estabelecem um contacto por forma a garantir resistência suficiente à peça. No caso do bloco Alveolus, as paredes exteriores são as que apresentam maior deformação por se tratarem de paredes simples e a ligação neste módulos é mais propícia à criação de fissuras que os módulos interiores. Como enunciado acima, as superfícies cónicas são aquelas de maior retração, laminação apresentam e por consequência deformação.

Em suma, quanto maior for o grau de complexidade dos modelos fabricados, mais difícil é a resposta da mistura, a retração é o maior influenciador negativo da mistura B que consequentemente leva ao aparecimento de laminações, fissurações e deformações nas paredes. As paredes simples devem ser evitadas se possuírem espessuras inferiores a 10mm ou então duplicadas garantindo assim uma maior estabilidade e resistência ao modelo produzido.



**Figura 4.44.** Secagem do modelo de estudo impresso AM Aalto, retração do material, camada a camada. Variação do bico de extrusão e paredes. Peça superior, parede simples com bico de extrusão de 10mm, peça central, parede simples com bico de extrusão de 3mm, peça inferior, parede dupla com bico de extrusão de 3mm.

**Figura 4.45.** Secagem do modelo de estudo fabricado, o bloco Alveolus, secagem em estufa.

**Figura 4.46.** Laminação do modelo de estudo Alveolus após secagem em estufa. Observação da retração das diferentes camadas, intensificação da laminação nas paredes simples. Deformação com maior visibilidade nas paredes simples, deformação com menor visibilidade nas paredes duplas.



## Acabamento

Produzida a mistura, validada a sua trabalhabilidade e aplicação no fabrico aditivo de objetos, o acabamento é a fase de menor relevância para o estudo individual de cada mistura, mas não deixa de possuir uma certa importância. É nesta fase de trabalho que se observa a qualidade de impressão dos objetos produzidos, a textura criada pela união dos diversos materiais escolhidos, o seu peso e tonalidade. De facto, o acabamento permite observar claramente o objeto produzido e analisá-lo, avaliando os erros executados e planificando estratégias futuras para a resolução destes.

Quanto à textura, é interessante analisar o acabamento final das peças após a secagem, a utilização da celulose em pó, ao invés da celulose em folha, potenciou o seu acabamento, nomeadamente a textura, Figura 4.48. Passou-se a obter um objeto impresso com elevada qualidade, limpo, muito cuidado, ao contrário do verificado com a utilização da mistura A, dando um ar mais tosco e descuidado à peça, fator derivado da utilização da pasta em folha. A utilização da pasta de celulose em pó permitiu que os seus grãos não fossem facilmente observados, isto pela manipulação de uma polpa moldável.

Quanto à tonalidade da pasta, a cor observada após a secagem deve-se em grande parte à cor final da celulose, esta passa de um tom branqueado para um branco amarelado pela presença do amido na mistura. A cor atribuída ao material após a sua fabricação e secagem, deve-se sobretudo aos materiais anexados a esta. Quanto maior é a quantidade de amido na mistura, mais amarelado o tom branco será, Figura 4.48 e 4.49.

O peso das peças produzidas é fortemente influenciado pelos materiais em estudo, verificando-se uma variação entre as peças com mistura A e B. Uma vez que a celulose em pó é um material mais leve e menos denso, todas as peças impressas com esta mistura assumem uma maior leveza em comparação com a mistura A. Esta leveza do material potencia a sua aplicabilidade em arquitetura, originando fachadas, paredes mais simples, resistentes e leves, Figura 4.49. Esta mistura apresenta elevadas potencialidades de exequibilidade.





**Figura 4.47.** Acabamento final das taças para o estudo da limitação de curvatura da mistura B.

**Figura 4.48.** Acabamento final dos peças AM Aalto. Variação do bico de extrusão e paredes. Peça superior, parede simples com bico de extrusão de 10mm, peça central, parede simples com bico de extrusão de 3mm, peça inferior, parede dupla com bico de extrusão de 3mm

**Figura 4.49.** Acabamento final do bloco Alveolus. Observação da retração das diferentes camadas.





## 4.2.5. Mistura B.1



**Figura 4.50.** Demonstração do material em estudo, o Amido.



**Figura 4.51.** Pasta de celulose em pó branqueada.



**Figura 4.52.** Demonstração do material em estudo, o Serrim.

Composta por amido, pasta de celulose em pó branqueada e fibras de madeira, Figura 4.52, a mistura B.1 é uma consequência da mistura B e surgiu com o intuito de resolver os problemas anteriormente observados durante a produção e fabricação de componentes ou modelos. Com a mesma composição, à exceção das fibras de madeira, o principal objetivo aquando a colocação destas na mistura era de resolver nomeadamente problemas ligados à retração do material. Como observado no estudo individual da mistura B, a sua trabalhabilidade superou os objetivos inicialmente traçados, sendo que o ponto de maior fragilidade observado era a constante laminação e destacamento entre as diferentes camadas que constituem o modelo fabricado. A laminação e destacamento entre as diferentes camadas era uma consequência da evaporação da água presente no amido e celulose durante a fase de secagem, provocando uma excessiva diminuição da sua dimensão. Pensou-se que ao colocar fibras no caso de estudo, fibras de madeira, a retração do material seria inferior ao observado anteriormente, pelo simples facto de que estas quando em contacto com o amido, não absorvem a água de igual forma à celulose eliminando a possibilidade de excessivas saturações, permanecendo com a dimensão original. Seguiram-se os seguintes passos:

1. Pesagem de 60gr de pasta de celulose em pó branqueada;
2. Pesagem de 350gr de amido previamente fervido;
3. Agregação de ambos os materiais, até obtenção de uma mistura homogénea.
4. Pesagem de 30gr de serrim e posterior agregação dos materiais compósitos.

Quando manipulada a mistura, pensou-se que devido à anexação das fibras de madeira, a sua fluidez seria alterada consideravelmente, tendo como base de referência a mistura B. Desta forma pensou-se que a mistura careceria de uma maior percentagem de Amido, o que quando utilizada para a geração de um modelo, tal fator foi anulado. Concluiu-se que a mistura B.1 apresenta uma fluidez e trabalhabilidade superior à alcançada aquando a exequibilidade da mistura B no FA. A colocação das fibras de madeira, permitiram também resolver o problema referente à fluidez da mistura, que durante a impressão provocava o excessivo desperdício de material. Estas conseguiram responder aos objetivos tra-

çados inicialmente, aumentando a trabalhabilidade da mistura à base de celulose em pó, garantindo assim que todos os seus pontos negativos fossem diluídos e atenuados com a simples colocação das fibras de madeira.

Tendo em conta as suas propriedades, é possível discernir que o comportamento obtido no ato de impressão é completamente distinto ao verificado no ato de secagem, como observado na tabela abaixo.

**Tabela 4.03.** Propriedades inerentes à mistura B.1, aquando a sua utilização e após secagem dos objetos produzidos.

	<b>Cru</b>	<b>Secagem</b>
<b>Retração</b>	-	Destacamento
<b>Humidade</b>	83 wt%	0 wt%
<b>Cor</b>	Castanha	Castanha
<b>Absorção de água</b>	Saturação dos grãos	Saturação dos grãos
<b>Resistência</b>	Nula	Muito elevada

**Figura 4.53.** Manipulação da mistura B, 60gr de celulose e 350gr de amido.

**Figura 4.54.** Pesagem de 30gr de fibras de madeira.

**Figura 4.55.** Agregação de ambos os materiais em estudo. Obtenção de uma mistura homogênea e compósita.



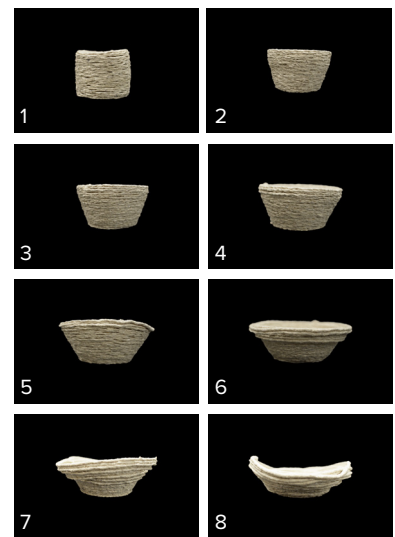
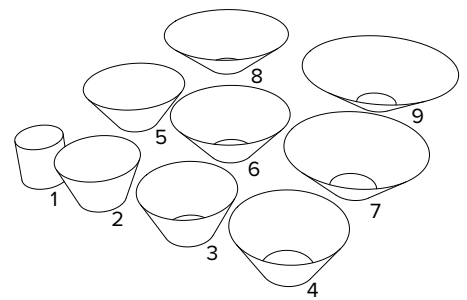
## Impressão

Gerada a mistura B.1, de acordo com o observado anteriormente no estudo individual da mistura B, indiretamente já se saberia que esta poderia ser um potencial candidato para aplicação no FA, contudo para se validar com certezas absolutas realizou-se um conjunto de testes, com o objetivo de responder aos parâmetros traçados. Este estudo dividiu-se em duas fases de trabalho, uma primeira ligada à validação da mistura e posterior aplicação para fabricação de componentes arquitetônicos e uma segunda fase ligada à observação do comportamento desta quando aplicada em contextos reais de fabricação de elementos arquitetônicos e formas mais complexas.

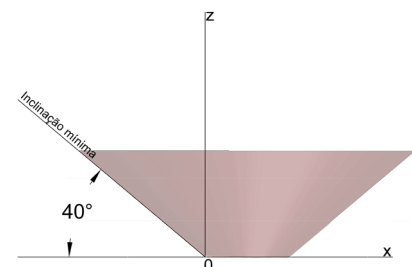
A primeira fase de trabalho divide-se ao longo de dois parâmetros de estudo, a validação da mistura, exequibilidade e trabalhabilidade desta. Para validar esta fase de trabalho realizou-se um primeiro teste que consistia na impressão de um conjunto de cones truncados, como já enunciado no estudo individual das anteriores misturas, onde se faz variar a inclinação das paredes com o propósito de observar a limitação da curvatura. De acordo com a Figura 4.58, esta conseguiu responde bem ao exercício lançado, obtendo uma resposta de trabalhabilidade superior ao observado na mistura B. De acordo com as produções realizadas, a mistura B.1 tem uma resposta excelente a partir de uma inclinação de  $40^\circ$ , como observado na Figura 4.56, sendo que esta inicia um processo de deformação quando as inclinações são inferiores ao limite máximo traçado no esquema, inferior a  $40^\circ$  — ver anexo 3.

Uma vez que os parâmetros de estudo lançados acima foram realizados com sucesso passou-se à segunda fase de estudo. Esta divide-se ao longo de dois parâmetros de estudo, o desenvolvimento de modelos orgânicos e formas mais complexas e a posterior produção de um componente arquitetônico, o bloco Alveolus. Validada a curvatura máxima permitida para a impressão com a mistura B.1, realizou-se um segundo teste como já enunciado no estudo individual das misturas anteriores, que consistia na fabricação das peças AM Aalto. Tendo em conta a observação dos modelos produzidos, segundo a observação da Figura 4.60, a mistura B.1 teve uma resposta excelente, independentemente do bico de extrusão utilizado e a espessura de parede dada. Foi possível observar que a fluidez da mistura é excelente devido à facilidade de resposta obtida na concretização das peças AM Aalto.

Observado o excelente desempenho de resposta da mistura B.1 e sendo um dos objetivos a estudar a fabricação de um componente arquitetônico, o bloco Alveolus, realizou-se este último teste com um grau de exigência superior aos traçados anteriormente. A sua impressão permitiu retirar múltiplas conclusões, não observadas aquando a fabricação dos testes anteriores, isto pela presença de paredes altas, paredes curvas e superfícies cônicas. A resposta da mistura B.1 foi superior ao observado aquando a fabricação do Alveolus com a mistura B. O índice



**Figura 4.56.** Primeira fase de trabalho, provetes produzidos com a mistura B. (1) cilindro, (2) cone truncado com  $20^\circ$  de curvatura, (3) cone truncado com  $25^\circ$  de curvatura, (4) cone truncado com  $30^\circ$  de curvatura, (5) cone truncado com  $35^\circ$  de curvatura, (6) cone truncado com  $40^\circ$  de curvatura, (7) cone truncado com  $45^\circ$  de curvatura e por fim, (8) cone truncado com  $50^\circ$  de curvatura.



**Figura 4.57.** Esquema demonstrativo da inclinação mínima pretendida para a fabricação das peças, nomeadamente para as misturas à base de celulose em pó, mistura B.1. Cone truncado com  $40^\circ$  de curvatura máxima, esquema 8, Figura 4.56.

de desperdício verificado aquando a finalização de uma geometria e o início de outra foi reduzido drasticamente pela fluidez obtida na mistura aquando a anexação da fibras de madeira. Estas conseguem melhorar a fluidez da mistura permitindo assim uma impressão mais cuidada, limpa e a obtenção de um produto com elevada qualidade. Quanto maior é a percentagem de fibras de madeira anexada mais precisa é a sua impressão. Para validar corretamente a retração da mistura, após a secagem, foram extrudidos cilindros de pasta e marcados devidamente com 10cm de comprimento, para que aquando a sua secagem, fosse possível retirar conclusões acerca do índice de retração do mesmo. Tendo em conta os testes realizados, a mistura B.1 apresenta um comportamento superior à mistura B e mistura A.

## Secagem

Tal como observado no estudo individual da mistura A e B, a secagem das peças produzidas com a mistura B.1, deve ser realizada em temperaturas controladas superiores a 30°C, em estufa. Enquanto que na mistura A e B, os agentes decompositores devem-se à presença do amido, na mistura B.1, se esta não for bem realizada, a decomposição da peça é acentuada pela presença do amido e das fibras de madeira. Quando a secagem não é completada, as fibras de madeira por estabelecerem contacto com água começam a ganhar fungos levando à sua decomposição. Para que este fator não se verifique, o intervalo de tempo de secagem deve ser superior às peças produzidas com a mistura A e B, para que as fibras de madeira consigam secar completamente.

Completada a secagem destas, a retração das peças é atenuada pela presença das fibras de madeira, observando-se uma diminuição considerável no destacamento e laminação produzida pela evaporação no ato de secagem, Figura 4.59 e 4.60. A retração da mistura B.1, dá-se de igual forma ao verificado na mistura B, as dimensões permanecem iguais, retraindo somente a espessura das diferentes camadas, ao qual se classificou como destacamento ou laminação. A retração da espessura das camadas foi atenuada na mistura B.1, tendo como base de estudo a mistura B, como se observa claramente na Figura 4.60. Quanto maior é a percentagem de fibras de madeira, menor é o destacamento e laminação observado, no ato de secagem.

Outro fator verificado aquando a utilização da mistura B.1, após a secagem é a sua resposta a geometrias mais complexas, respondendo bem a formas enviesadas, formas cónicas e orgânicas, como na produção das peças AM Aalto e do bloco Alveolus, Figura 4.59 e 4.60, consecutivamente. A deformação das peças dá-se com menor intensidade mas não é totalmente eliminada, para evitar tal consequência, optou-se por produzir objetos com espessuras de camadas superiores, Figura 4.63, ou duplicação dessas. No bloco Alveolus, as deformações observadas devem-se ao facto de as paredes exteriores serem paredes simples e com espessuras relativamente pequenas, estando aptas também a uma maior probabilidade de laminação. Já as paredes interiores do bloco, por se tratarem de paredes duplas, a deformação destas é menor que nas exteriores.



**Figura 4.58.** Impressão das peças AM Aalto com a mistura B.1.

**Figura 4.59.** Secagem das peças AM Aalto, em estufa, com temperaturas superiores a 40°C. Retração e deformação das peças pouco observada.

**Figura 4.60.** Secagem do bloco Alveolus, em estufa, com temperaturas superiores a 40°C. Observação da deformação e laminação das camadas.



## Acabamento

Produzida a mistura, validada a sua trabalhabilidade e aplicação no fabrico aditivo de objetos, o acabamento é a fase de menor relevância para o estudo individual de cada mistura, mas não deixa de possuir uma certa importância. É nesta fase de trabalho que se observa a qualidade de impressão dos objetos produzidos, a textura criada pela união dos diversos materiais escolhidos, o seu peso e tonalidade. De facto, o acabamento permite observar claramente o objeto produzido e analisá-lo, avaliando os erros executados e planificando estratégias futuras para a resolução destes.

Quanto à textura, é interessante analisar o acabamento final das peças após secagem, a introdução das fibras de madeira permitiu claramente alterar o acabamento final destas, permitindo que este fosse muito mais cuidado que o observado na mistura B. A sua textura nunca é igual observando-se as fibras de madeira com diferentes cores e tamanhos.

Quanto à tonalidade e após a observação das peças produzidas com a mistura B, a introdução das fibras de madeira alterou consideravelmente a cor adotada pela mistura, esta de tons brancos passou a assumir um tom mais acastanhado, como observado na Figura 4.61. Acredita-se que a cor obtida com a mistura B.1, depende da cor das fibras de madeira introduzidas no ato de execução da mistura, se estas adotarem cores mais esverdeadas, então a peça terá um acabamento mais esverdeado e vice-versa. A tonalidade das peças também depende claramente da quantidade de fibras introduzidas na mistura, quanto maior é a sua percentagem, mais forte é a tonalidade observada. Segundo a Figura 4.62, a peça superior apresenta uma menor percentagem de fibras de madeira o que faz com que esta assuma um tom mais claro, em contrapartida, a peça central, possui uma quantidade superior à anterior, levando a que o tom desta seja intensificado. Este fator deve-se claramente à concentração de fibras na mistura.

Em relação ao peso, é possível comprovar que a presença de fibras de madeira tende a aumentar o seu peso em comparação com a mistura B. Quanto maior é a quantidade de fibras de madeira introduzidas, mais pesadas as peças ficam. Este fator deve-se à permanência das propriedades das fibras de madeira quando anexadas à mistura B.

**Figura 4.61.** Acabamento final observado após secagem das taças, para estudo da limitação de curvatura máxima suportada pela mistura B.1. Esta peça apresenta cerca de 30gr de fibras de madeira.



**Figura 4.62.** Acabamento final das peças AM Aalto. Peça superior com cerca de 15gr de fibras de madeira, peça central com 45gr de fibras de madeira e por fim, peça inferior com 30gr de fibras de madeira. Observação da textura, cor do material e suas retrações e deformações.



**Figura 4.63.** Acabamento final do bloco Alveolus, com cerca de 30gr de fibras de madeira. Observação da textura, cor do material e suas retrações e deformações.





## 4.2.6. Conclusões

Testados os materiais e desenvolvidas as misturas, com exceção de algumas, a maioria apresentaram características suficientes para uma boa trabalhabilidade, utilizando as pasta de celulose como base de estudo. Aquelas que melhores resultados apresentaram, foram estudadas com maior detalhe, no subcapítulo em estudo 4.2. A celulose e o amido. Analisado o estudo individual das três misturas selecionadas, pôde-se concluir que o comportamento observado quando utilizadas para a fabricação de componentes, tirando partido das técnicas de fabrico aditivo, foram divergentes entre si. O presente subcapítulo pretende demonstrar a mais vantajosa para aplicação e produção de protótipos rápidos. Foi tido em conta fatores como o modo de preparação, a fluidez da pasta, a impressão, a secagem, a retração, a deformação e o acabamento final.

1.Tendo em conta o modo de preparação da pasta, a mistura B é a que mais facilidade apresenta no ato de manipulação porque a pasta de celulose em pó não necessita de prévias transformações como na mistura A. A mistura B.1 é de igual forma acessível sendo necessário ter um certo cuidado na peneiração das fibras de madeira para que estas não apresentem dimensões superiores às requeridas.

2.Tendo em conta a fluidez da pasta, a mistura B.1 foi a que melhores resultados apresentou, seguida da mistura B. A fluidez foi testada no ato de impressão. A mistura A foi a que maiores dificuldades apresentou no controlo da fluidez porque para transformar as folhas em grãos o controlo do teor de humidade era extremamente difícil, provocando assim pastas mais fluidas que outras.

3.No ato de impressão da pasta, a mistura B.1 foi a que mais potencialidades apresentou através da limpeza e qualidade do produto fabricado. Também foi esta a que menor índices de desperdício da pasta exibiu. O oposto foi verificado aquando da utilização da mistura A na impressão, os desperdícios da pasta são excessivos e a qualidade de impressão é negativa.

4.A secagem foi o único parâmetro de estudo em que as três misturas corresponderam de igual forma. Para se realizar a secagem dos objetos produzidos, estes teriam que ser sujeitos à estufa e sujeitas a temperaturas controladas e superiores a 30°C com um intervalo de

tempo superior a 24 horas, caso isto não fosse verificado, todos os modelos impressos sofriam decomposição após três dias.

5.A retração segundo a dimensão da base é comum a todas as misturas. Todas elas apresentam uma retração nula em que as dimensões do modelo digital são semelhantes às dimensões do modelo fabricado. Quando referida a retração em altura, tema estudado como laminação ou destacamento entre camadas, a mistura B é a que maior índice apresenta. No ato de secagem a água evapora o que provoca uma maior redução da espessura das diferentes camadas. A mistura A, devido à granulometria dos grãos de celulose e à consequente deposição do material, a laminação ou destacamento não é verificado, uma vez que a impressão em altura com esta mistura é difícil de consolidar.

6.A deformação é verificada maioritariamente na mistura B, devido à evaporação da água, este fator é acentuado aquando da verificação da laminação entre as múltiplas camadas do objeto. A mistura B.1, consegue ter uma resposta superior devido à resistência e rigidez conferida pelas fibras de madeira.

7.O acabamento final diverge de mistura para mistura. A mistura B e B.1 possuem um acabamento mais limpo e cuidado. O mesmo não se verifica na mistura A, uma vez que esta possui um acabamento mais tosco e uma impressão pouco cuidada e precisa. Ambas as misturas A e B possuem uma tonalidade branca e a mistura B.1 tonalidades acastanhadas, cor conferida pela presença de fibras de madeira na mistura.6

Analisados os diversos parâmetros entre as três misturas em estudo, mistura A, mistura B e mistura B.1 é possível concluir que a mistura que apresenta mais potencialidades de aplicabilidade para a fabricação de elementos arquitetónicos, tirando partido das técnicas de fabrico aditivo, é a mistura B.1. Ao longo do estudo individual de cada mistura todos os parâmetros mencionados foram estudados com um elevado rigor, uma vez que a mistura B.1 foi uma consequência da mistura B, e que resultou como resposta aos erros observados aquando da utilização da B. Esta última consegue responder bem à retração, à deformação, à laminação e possui elevada resistência a forças aplicadas que conferem um acabamento limpo e cuidado após a produção e secagem. A sua textura é interessante pela observação das diferentes fibras de madeira o que pode conferir diversas tonalidades de acordo com as fibras introduzidas. Em suma, todas elas trabalham o mesmo material, a celulose, mas o seu comportamento quando aplicado para a geração de objetos, recorrendo ao fabrico aditivo, é divergente.

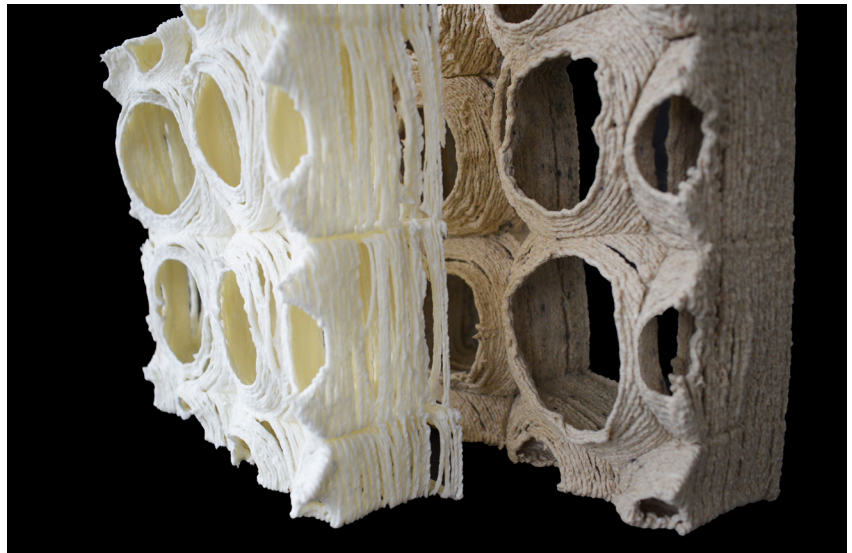


**Figura 4.64.** Fabricação de pequenos círculos com a mistura A, observação do acabamento robusto e tonalidade branqueada.

**Figura 4.65.** Fabricação dos blocos Alveolus com a mistura B e B.1. Observação do acabamento final e tonalidade de ambas as peças, laminação e destacamento sem fibras de madeira e com fibras de madeira.

(esquerda mistura B, direita mistura B.1)

**Figura 4.66.** Aspeto final da mistura com mais potencialidades para fabricação de elementos arquitetónicos, tirando partido das técnicas de fabrico aditivo.





## 4.3. A celulose e a argila

*“The properties of ceramic materials enable a variety of architectural applications. Hardness, density, durability, ability to take on a wide range of finish appearances, and other properties have facilitated the application of ceramics in buildings throughout the world for centuries” (Bechtold, 2015).*

A cerâmica surgiu com os antepassados do homem, deixando vestígios por diversas civilizações e culturas que existiram à milhares de anos. Trata-se de um dos materiais mais antigos aplicados na indústria e nasceu aquando a utilização do barro pelo homem, passando a substituir muitos outros materiais e técnicas como a pedra trabalhada, a madeira e as vasilhas feitas com frutos. Esta técnica molda os minerais provenientes das entranhas da terra, como os metais, o barro, a argila e a areia. Para a sua fabricação, utiliza-se como matéria-prima principal, a Argila ou Clay, um termo amplo que descreve uma família de materiais naturais que possuem propriedades composicionais, que quando queimadas tornam-se cerâmicas (Bechtold, 2015). As argilas são minerais provenientes das rochas sedimentares e obtidas pelas suas múltiplas alterações químicas e físicas. Os minerais que as constituem são fundamentalmente caulinite, ilite ou montemorilonite. As cerâmicas à base de argila têm características de materiais regionais únicas que variam com base nas condições geológicas num determinado local ao longo dos séculos (Bechtold, 2015). Por se encontrarem na natureza, num estado relativamente puro, podem adquirir propriedades diversas, como as margas, argilas com elevado teor de calcário. As argilas podem dividir-se em dois grupos, as argilas primárias, que permaneceram no seu local de formação e as argilas secundárias, que foram arrastadas por agentes naturais como a água, o vento, depositando-se longe do seu local de formação.

Uma vez que é do interesse desta investigação científica a aplicação desta matéria-prima, a argila, juntamente com a celulose para a fabricação de elementos arquitetónicos, o presente subcapítulo visa a demonstração dos materiais utilizados, exponenciando as propriedades ao longo das suas misturas e testes de extrusão realizados no âmbito desta investigação.



## 4.3.1. Estudos prévios

**Tabela 4.04.** Demonstração das propriedades da pasta cerâmica ou argila GRES 130, com comparação entre o comportamento em cru e após secagem. A informação apresentada é uma compilação da ficha técnica do material.

A argila é um mineral proveniente das rochas sedimentares que de acordo com o local onde se encontram podem originar múltiplos tipos pela agregação de outros materiais ou minerais. Esta versatilidade permite agrupar certos tipos de argila para a fabricação de determinados objetos e outras especificidades para aplicação na arquitetura moderna.

*“Modern architectural ceramics have highly tailored material properties that are determined by specific mixes of raw materials (clay bodies). (...) Most clay bodies for architectural ceramics are earthenware and stoneware - Both sedimentary clay types - as well as porcelain. These terms, used in common language to reference pottery, here designate technical expressions of the blends of clays and additives” (Bechtold, 2015).*

A pasta cerâmica utilizada para a conceção deste estudo é uma mistura à base de grés e água da marca Vicar<sup>1</sup>, com nome GRÉS 130 MP<sup>2</sup>. Esta pasta apresenta propriedades excecionais quando aplicadas para FA e o teor de humidade é o grande influenciador da trabalhabilidade desta. Como observado na tabela abaixo apresentada, esta possui um comportamento dispare quando em estado cru e após secagem.

	<b>Cru</b>	<b>Secagem</b>
<b>Retração</b>	4,5 a 6,5%	5 a 6,5%
<b>Humidade</b>	87 wt%	0 wt%
<b>Cor</b>	castanha	cinzenta
<b>Absorção de água</b>	100%	0 a 2%
<b>Resistência</b>	nula	elevada

1. A marca Vicar é uma empresa sediada em Manises, Valença, que se dedica à elaboração e produção de pastas cerâmicas e tratamento de matérias-primas. É especializada em duas áreas, as cerâmicas dedicadas ao setor sanitário, artístico, azulejo, entre outros, e ao setor da cerâmica técnica, onde oferecem composições de pastas plásticas para extrusão, prensagem e moldagem. Uma empresa de família fundada nos anos de 1972, que trabalha a cerâmica oferecendo panóplias de possibilidades de produtos. (Retirado do site: [www.vicar-SA.es](http://www.vicar-SA.es))

2. A pasta de argila GRES 130 MP, é um grés cerâmico, formado por argilas e materiais como sílica ou feldspato. As suas principais características são a dureza e a sua baixa absorção de água, uma vez cozidas a altas temperaturas. (Retirado do site: [www.vicar-SA.es](http://www.vicar-SA.es))

A partir da mesma base de pasta cerâmica é possível transformar esta em distintas outras pastas, onde a sua plasticidade é o elemento de contingência que as diferenciam. Quanto maior é o teor de humidade presente, maior é a plasticidade desta, o que na produção de objetos com geometrias mais complexas é um fator de elevada importância e vice-versa.

Tratando-se de uma matéria-prima previamente estudada na sua forma primária, sem a adição de qualquer aditivo, a anexação de fibras de celulose pretende dar a conhecer uma nova pasta, evidenciando as potencialidades desta na resolução de problemas verificados com a pasta na sua forma original. Esses problemas consistem na:

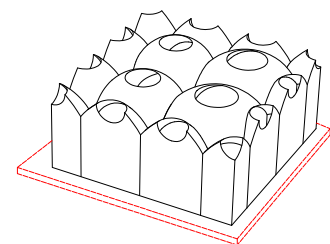
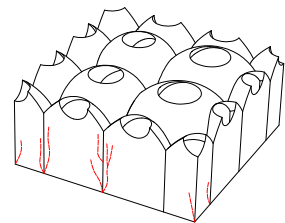
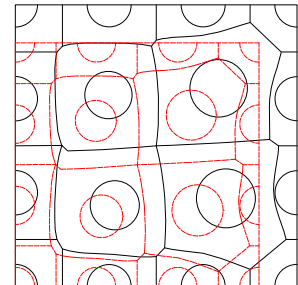
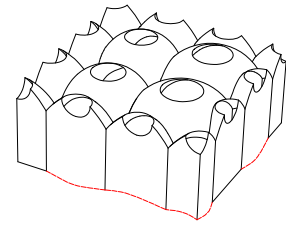
1. **Retração excessiva** do material que origina deformações nas paredes dos modelos impressos após a secagem;
2. Retração excessiva do material tendo em conta as dimensões inicialmente propostas;
3. **Fissuração** entre conexões dos modelos impressos após secagem;
4. **Peso** dos modelos impressos.

Para solucionar estes problemas retratados, acreditou-se que a colocação de fibras de celulose potenciarão a trabalhabilidade, comportamento e resistência da pasta. Com o objetivo de demonstrar tais conclusões realizou-se um conjunto de testes, onde se faz varia a percentagem de celulose presente na mistura. Dividiu-se esta investigação em dois núcleos:

Argila + Pasta de celulose em folha branqueada + água = **Mistura C**

Argila + Pasta de celulose em pó branca + água = **Mistura D**

Cada núcleo ou mistura foi estudada ao longo de quatro etapas: a descrição, a impressão, a secagem e o acabamento, onde se apresenta os diversos estudos e conclusões retidas nos diversos campos.



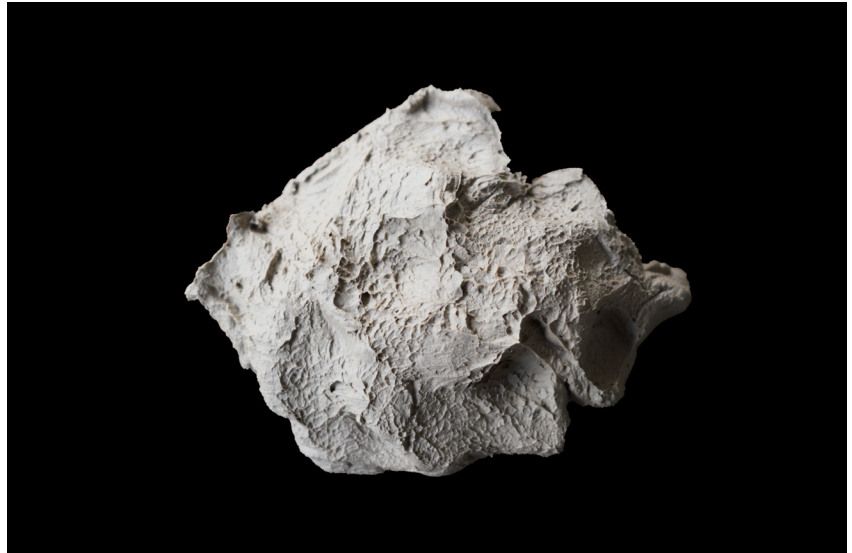
**Figura 4.67.** Problemas verificados com a pasta de argila sem celulose. Primeiro esquema, deformações após secagem, segundo, retração do material, terceiro, fissuração entre conexões, por fim, quarto, peso dos modelos fabricados.



**Figura 4.68.** Demonstração do material em estudo, a Argila.

**Figura 4.69.** Pasta acabada de celulose em folha branqueada.

**Figura 4.70.** Pasta de celulose em pó branqueada.





## 4.3.2. Mistura C



**Figura 4.71.** Demonstração do material em estudo, a argila.



**Figura 4.72.** Pasta acabada de celulose em folha branqueada.

Composta por pasta de celulose em folha branca e pasta de cerâmica, Figura 4.71, uma mistura à base de grés e água da marca Vicar, com nome GRÉS 130 MP, esta mistura foi pensada com o propósito de resolver algumas das falhas observadas e enunciadas no subcapítulo 4.4.1. *Estudos Prévios*. Esta pasta cerâmica é fornecida com um teor de humidade próximo a 18% para que apresente a trabalhabilidade necessária para fabricação e utilização no FA. De acordo com testes realizados no ACLab, descritos no artigo *Ceramic 3D printing - The Future of brick architecture*, o teor de humidade adequado para obtenção de modelos com boa qualidade de impressão, o teor de humidade deverá entre os 33 a 35% (Cruz et al., 2017). Para determinar este fator foram utilizadas várias técnicas e dispositivos de medição para determinar qual o teor de água necessário para a pasta em estudo. O método de Pfefekorn tem a capacidade de avaliar e controlar a plasticidade do grés utilizado, determinando a quantidade de água necessária a anexar para que esta atinja reduções de 30% na sua altura em relação à altura inicial do corpo de teste (Cruz et al., 2017). Esta medição baseia-se na deformação pelo impacto sofrido. Determinada a quais os níveis de humidade a respeitar, através de uma relação matemática, determina-se qual a quantidade de água em falta para que esta atinja níveis de humidade de 33 a 35%.

A utilização da pasta cerâmica não é uma novidade implementada no FA, como já enunciado no capítulo 2. *Enquadramento*. Dadas as descobertas alcançadas com pasta cerâmica pensou-se que a celulose poderia ser um agregado ou aditivo potenciador da mistura. Tendo em conta o estudo realizado com a pasta de celulose em folha que originou a mistura A, foi possível concluir que como material a aplicar para a fabricação de componentes arquitetónicos não possui características suficientes, assim sendo, implementou-se a celulose em folha como material aditivo. Esta abordagem permitiu gerar uma nova de utilização da pasta. Como já referido no subcapítulo 3.2.1. *Pasta acabada de celulose em folha*, esta matéria-prima necessita de se transformar antes da sua mistura a outros materiais, Figura 4.76. Para gerar a mistura C, é necessário seguir somente três passos.

1. A pesagem de 1000gr de pasta de cerâmica, argila do tipo GRÉS 130 e posterior colocação da água em falta;

2. A pesagem da quantidade de pasta acabada de celulose em folha branca pretendida;
3. Agregação de ambos os materiais, até obtenção de uma mistura homogénea.

Quando aplicada em FA, a mistura C apresenta potencialidades superiores às descritas na mistura A, isto porque a celulose em folha branca tem uma resposta superior como material aditivo àquela observada na manipulação da mistura A. De facto, a presença de pequenos grãos de celulose potencia a trabalhabilidade da mistura, mas como já referido anteriormente é necessário ter um cuidado extra na manipulação da pasta de celulose em folha, quando transformada pode originar dois problemas, um primeiro relacionado com o teor de humidade presente nos grãos de celulose que origina misturas muito fluidas após a união com pasta cerâmica, um segundo relacionado com a dimensão dos grãos, sendo extremamente difícil obter uma pasta homogénea. Este fator pode levar a problemas de impressão, como o entupimento do bico de extrusão ou à presença de crateras, formadas pelos grãos de celulose muito secos, que ao estabelecerem contacto com a argila absorvem a humidade presente e após a extrusão da pasta, são lançadas com muita pressão criando buracos no modelo produzido.

Dada a possibilidade de colocação de várias percentagens de celulose na pasta de cerâmica, definiu-se um estudo gerando múltiplas misturas até se obter uma consistência interessante para exploração. Iniciado com a mesma quantidade de pasta cerâmica um 1kg de argila, foi fundamental pensar numa razão para a colocação da celulose, deste modo foi-se acrescentando 25gr ao longo das misturas criadas.

1. Mistura 1: 1kg de pasta cerâmica e 25gr de pasta de celulose;
2. Mistura 2: 1kg de pasta cerâmica e 50gr de pasta de celulose;
3. Mistura 3: 1kg de pasta cerâmica e 75gr de pasta de celulose;
4. Mistura 4: 1kg de pasta cerâmica e 100gr de pasta de celulose;

Sempre que acrescentadas 25gr de celulose em grão seco à mistura, o teor de humidade baixava consideravelmente devido à higroscopicidade da celulose, se a celulose em pasta era húmida então o teor de humidade presente na mistura aumentava consideravelmente. Para contornar este fator, transformou-se a celulose em pasta húmida, retirando o excesso de água presente, colocando-se os grãos sobre uma superfície seca para que o excesso de água evapora-se, a uma temperatura ambiente num intervalo de 12 a 18 horas. Isto permitiu que o excesso de água nos grãos de celulose evaporasse garantindo assim uma matéria-prima húmida. Após as conclusões retiradas eliminou-se a possibilidade de utilização de pasta de celulose em folha seca.

A mistura C apresenta comportamentos dispares quando no seu estado cru, após impressão e estado final, após secagem, como observado na tabela abaixo apresentada.

**Tabela 4.05.** Demonstração das propriedades da pasta cerâmica, argila do tipo GRÉS 130 e pasta de celulose em folha transformada húmida, com comparação entre o comportamento em cru e após secagem.

	<b>Cru</b>	<b>Secagem</b>
<b>Retração</b>	4,5 a 6,5%	5 a 6,5%
<b>Humidade</b>	87 wt%	0 wt%
<b>Cor</b>	castanha	cinzenta
<b>Absorção de água</b>	100%	0 a 2%
<b>Resistência</b>	nula	elevada

O teor de humidade é o parâmetro que maior atenção necessita pela união dos grãos de celulose à mistura.



**Figura 4.73.** Pesagem de 1000gr de pasta cerâmica e anexação da água em falta para obtenção do teor de humidade pretendido.



**Figura 4.74.** Pesagem da percentagem da pasta de celulose em folha transformada necessária.



**Figura 4.75.** Agregação de ambos os materiais e obtenção da mistura C.



## Impressão

**Tabela 4.06.** Demonstração das propriedades da pasta cerâmica, argila do tipo GRÉS 130 e pasta de celulose em folha transformada húmida, com comparação entre o comportamento em cru e após secagem.

Diferente do estudo anteriormente realizado no subcapítulo 4.2. *A celulose e o amido*, o subcapítulo descrito em 4.3. *A celulose e a argila* possui um método de trabalho distinto. Uma vez que a pasta de cerâmica é um material muito utilizado na fabricação de componentes arquitetónicos, recorrendo ao uso do FA, o estudo da mistura C baseia-se na possibilidade de melhoria da pasta de argila. Como já enunciado, foram desenvolvidas cinco misturas de estudo, sendo uma delas motivo de comparação às restantes, por se tratar de uma mistura sem a anexação de celulose, somente grés e água.

	Argila Gres 130 MP	Celulose em folha	Água anexada
Mistura 1	1Kg	0gr	0gr
Mistura 2	1Kg	25gr	0gr
Mistura 3	1Kg	50gr	0gr
Mistura 4	1Kg	75gr	0gr
Mistura 5	1Kg	100gr	0gr

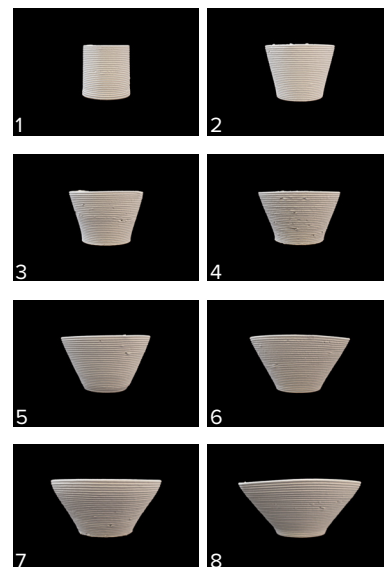
Como anteriormente foram definidos parâmetros de estudos que consistem na trabalhabilidade e exequibilidade na mistura aquando a anexação da celulose e o comportamento desta quando aplicada em contextos reais de fabricação.

A primeira fase de trabalho resultou na análise da trabalhabilidade e exequibilidade da mistura quando anexada a celulose. Para validar esta fase de trabalho realizou-se um primeiro teste que consistia na impressão de um conjunto de cones truncados, como já enunciado no estudo individual das anteriores misturas, onde se faz variar a inclinação das paredes com o propósito de observar a limitação da curvatura. De acordo com a Figura 4.77, todas as misturas, 1 a 4, conseguiram responder bem ao exercício lançado. Em termos de facilidade de impressão, a mistura que melhor respondeu a este exercício foi de facto a mistura 2, pela presença de uma menor quantidade de celulose em folha transformada, esta também foi a que demonstrou resultados mais limpos e cuidados. Em termos de estabilidade de impressão, quanto maior é a quantidade de celulose na mistura, 3 e 4, maior é a resistência adquirida assim como maior é a espessura das camadas, obtendo-se um modelo seguramente com um grau de resistência superior à mistura 1 — ver anexo 9 a 15.

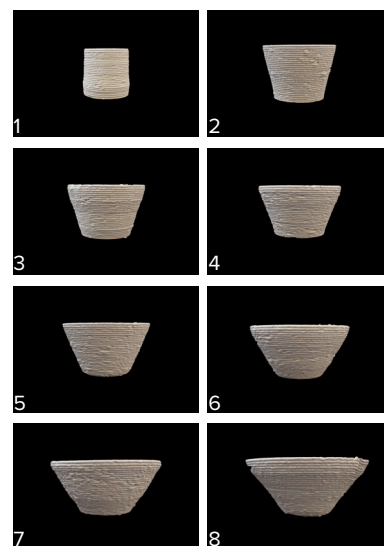
Validados os parâmetros acima enunciados, passou-se a uma segunda fase de trabalho, a verificação do comportamento da mistura quando aplicada em contextos reais. Realizou-se um segundo teste, como já enunciado no estudo individual das misturas anteriores, que consistia na fabricação das peças AM Aalto. A fabricação do primeiro modelo com 25gr de celulose em folha transformada, foi realizado com qualidade, cuidado e limpeza. Já a fabricação do segundo modelo de estudo, Figura 4.79, com 75gr de celulose em folha transformada, não superou as expectativas lançadas após a idealização do primeiro modelo. Pela

diversidade granulométrica dos grãos de celulose em folha transformada, a impressão foi interrompida pelo entupimento do bico de extrusão. Visando o acontecimento, foi produzido um terceiro modelo de estudo, tendo em conta os mesmos parâmetros anteriores e esta foi novamente interrompida pelo mesmo erro verificado anteriormente. De facto, quanto maior é a quantidade de celulose em folha transformada na mistura, maior é a probabilidade da presença de possíveis erros. Quando produzidos componentes mais complexos, as misturas que obtêm melhor resposta são aquelas que possuem menor quantidade de celulose presente, mistura 1 e 2.

Um dos problemas verificados aquando o armazenamento da pasta para posterior utilização, num intervalo de tempo de 12 a 16 horas, foi a constante criação de crateras no ato de impressão, Figura 4.80. Este comportamento adotado pela mistura deve-se à presença de celulose húmida na pasta de argila que quando em contacto com esta durante muito tempo, deixa de possuir humidade, esta é absorvida pela argila e quando utilizada para a fabricação de objetos, a celulose é extrudida pelo bico com elevada pressão. O contacto entre a celulose e argila provoca uma alteração na mistura, originando crateras sempre que um grão de celulose é expulso, como observado claramente na Figura 4.80. A celulose em folha transformada, apesar de possuir um comportamento superior à mistura A, continua a apresentar algumas limitações para FA.



**Figura 4.76.** Primeira fase de trabalho, provetes produzidos com a mistura 1. (1) cilindro, (2) cone truncado com 20° de curvatura, (3) cone truncado com 25° de curvatura, (4) cone truncado com 30° de curvatura, (5) cone truncado com 35° de curvatura, (6) cone truncado com 40° de curvatura, (7) cone truncado com 45° de curvatura e por fim, (8) cone truncado com 50° de curvatura.

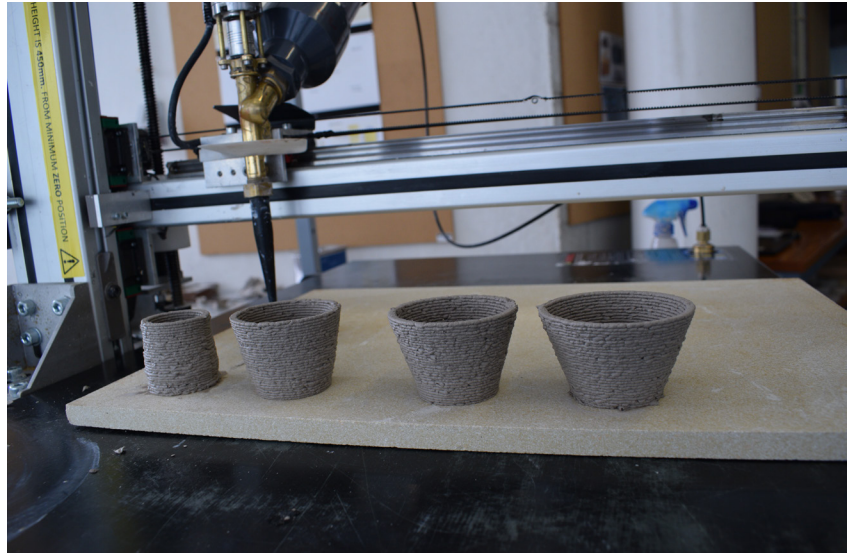


**Figura 4.77.** Primeira fase de trabalho, provetes produzidos com a mistura 2. (1) cilindro, (2) cone truncado com 20° de curvatura, (3) cone truncado com 25° de curvatura, (4) cone truncado com 30° de curvatura, (5) cone truncado com 35° de curvatura, (6) cone truncado com 40° de curvatura, (7) cone truncado com 45° de curvatura e por fim, (8) cone truncado com 50° de curvatura.

**Figura 4.78.** Fabricação dos cones truncados, para estudo da deformação e inclinação das diferentes misturas criadas com celulose. Impressão com a mistura 3.

**Figura 4.79.** Produção da peça AM Aalto, parede dupla e bico de extrusão de 0,3mm, com a mistura 3. Entupimento do bico de extrusão com grãos de celulose transformados, originando defeitos no modelo. Modelo impresso com metade da altura inicialmente proposta.

**Figura 4.80.** Impressão de um modelo de estudo com mistura de argila e pasta de celulose em folha, preparada no dia anterior. Observação do comportamento da celulose quando anexada à argila.



## Secagem

As peças produzidas com a mistura C demonstraram no ato de secagem algumas complicações devido ao excessivo índice de retração que a mistura apresenta, pensava-se que a anexação de fibras de celulose atenuaria este parâmetro de estudo, de facto este permaneceu semelhante ao observado quando seca uma peça com pasta de cerâmica sem celulose. Se o índice de retração da pasta de cerâmica sem celulose varia entre 4,5% a 6,5% em cru e 5 a 6,5% após cozedura, este é semelhante ao observado no comportamento da mistura C, independentemente da quantidade de celulose anexada ou a inexistência dela. O processo de cura da pasta de argila é a sua maior desvantagem, para evitar excessivas retrações e deformações, é necessário ter em conta as variações térmicas a que está sujeita, pois se estas forem demasiado bruscas podem originar outras consequências como fissurações nas zonas mais frágeis. A presença das fibras de celulose consegue atenuar essas possíveis fissurações e deformações, desde que a cura seja realizada com cuidado. Para se evitar tais efeitos é aconselhável a colocação dos modelos em ambientes controlados em estufa, a temperaturas baixas e constantes, abrandando a rápida desidratação do material. Comparando as peças produzidas com as diversas misturas, quanto maior é a percentagem de celulose menor é o grau de deformação e fissuração presentes. Conforme é possível observar na Figura 4.81 onde demonstra a deformação diferente, ao observado nas Figuras 4.82 e 4.83.

Analisando o comportamento dos testes produzidos, foi possível retirar algumas conclusões. O primeiro teste, a fabricação dos cones truncados para o estudo da limitação de curvatura suportada pela mistura, quando impressas, independentemente da quantidade de celulose em folha transformada misturada, apresentavam sempre a mesma dimensão, após a secagem e cozimento das peças, estas dimensões variaram significativamente, conforme o registo na tabela abaixo apresentada.

	Argila Grés 130 MP	Celulose em folha trans- formada	Água Adiciona- da após mistura	Índice de retração do diâmetro	Índice de retração da altura
Mistura 1	1000gr	0gr	0gr	11%	11%
Mistura 2	1000gr	25gr	0gr	7%	10%
Mistura 3	1000gr	50gr	0gr	9%	10%
Mistura 4	1000gr	75gr	0gr	8%	8%
Mistura 5	1000gr	100gr	0gr	8%	15%

Quando estudado o índice de retração das diferentes misturas, é possível constatar que o verificado nas mistura 1 é semelhante ao verificado nas restantes misturas com adição de celulose. As variações entre as misturas devem-se sobretudo a vibrações durante a impressão ou deformações causadas pela desidratação do material, sendo que a mistura que mais controlo na forma e após secagem apresenta é a mistura 3. Quando estudado o índice de retração da altura, verifica-se clara-

**Tabela 4.07.** Demonstração das misturas idealizadas e possíveis índices de retração das taças truncadas para estudo da limitação da curvatura.

**Tabela 4.08.** Demonstração das propriedades da pasta cerâmica, argila do tipo GRÉS 130 e pasta de celulose em folha transformada húmida, com comparação entre o comportamento em cru e após secagem.

mente uma variação suave entre os diferentes valores. Pensava-se que a percentagem de celulose anexada à mistura alteraria a dimensão da peça devido ao peso desta mas esse fator não acontece. A mistura que apresenta valores mais acentuados é a mistura 4, isto pela quantidade elevada de celulose na mistura. Quanto maior é a altura do objeto, maior é o achatamento das diferentes camadas, este dá-se sobretudo devido à forma dos diferentes cones, por se tratarem de formas orgânicas e com graus de curvatura acentuados. Em síntese o apoio entre camadas tende a diminuir com o grau de curvatura levando a peças mais frágeis. Devido à forma dos provetes produzidos, os dados obtidos para o estudo do índice de retração e deformação foram inconclusivos.

Para melhor comprovar qual o comportamento da mistura quando adicionada celulose à sua composição foram realizados três testes que consistiam na impressão de três peças AM Aalto com composições diferentes, Figura 4.86 e 4.88, como observado na tabela abaixo apresentada.

Peças AM Aalto	Estado de secagem	Dimensão Inicial (cm)	Dimensão Final (cm)	Índice de Retração do diâmetro	Índice de Retração da altura	Peso
Mistura 1	Cozida	12x13,6x4	11,3x13x3,6	7%	6%	46,5gr
Mistura 2	Cozida	12x13,6x5	11,3x13x4,6	7%	6%	136gr
Mistura 4	Cozida	12x13,6x3,3	11,7x13,2x2,5	3%	4%	96,6gr

Por ser uma peça fabricada sem qualquer aditivo, a deformação desta foi elevada. O primeiro teste consistiu na impressão de uma peça AM Aalto com pasta de cerâmica sem celulose e seco a temperatura ambiente. Através da tabela acima é possível observar que o índice de retração do diâmetro é superior ao índice de retração verificado na altura.

O segundo teste consistiu na impressão de uma peça com pasta de cerâmica e 25gr de folha transformada. O índice de retração do diâmetro é igual ao verificado no primeiro teste, assim como o índice de retração em altura. Devido à presença de celulose na mistura a deformação foi atenuada comparada com o teste inicial. O último teste consistiu na impressão de uma peça AM Aalto com pasta de cerâmica e 100gr celulose, o índice de retração da pasta é inferior ao verificado nos anteriores testes, este fator devido à presença de celulose. Pensava-se que pela anexação das fibras de celulose, dado que o processo de cozedura atinge temperaturas máximas de 1260°C, pudessem entrar em combustão deixando marcas nas superfícies um acabamento com pouca qualidade. De facto, isto não é verificado, a peça apresenta rigidez, resistência e um acabamento interessante. As fibras de celulose, aquando a fase de cozedura, transformam-se em pequenos grãos de areia vitrificados de tons brancos. Estas também conferem maior resistência e leveza ao material, e alteram a cor final do objeto, para tonalidades mais claras, como observado na Figura 4.86.



**Figura 4.81.** Secagem do cone truncado com 70° de curvatura. Fabricação do modelo com a mistura de pasta cerâmica, argila do tipo GRÉS 130 MP, sem celulose.



**Figura 4.82.** Secagem do cone truncado com 70° de curvatura. Fabricação do modelo com a mistura de pasta cerâmica, argila do tipo GRÉS 130 MP e 25gr de pasta de celulose em folha transformada, mistura 1.



**Figura 4.83.** Secagem do cone truncado com 70° de curvatura. Fabricação do modelo com a mistura de pasta cerâmica, argila do tipo GRÉS 130 MP e 50gr de pasta de celulose em folha transformada, mistura 2.

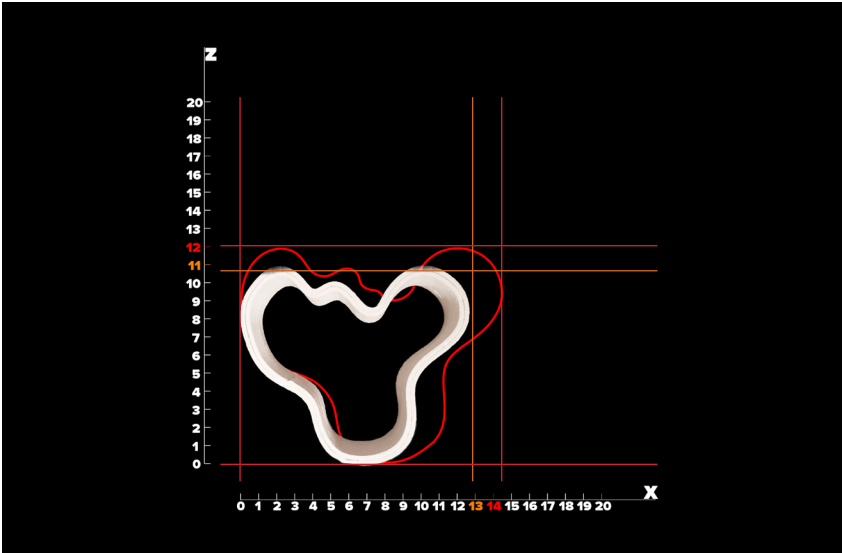


**Figura 4.84.** Secagem do cone truncado com 70° de curvatura. Fabricação do modelo com a mistura de pasta cerâmica, argila do tipo GRÉS 130 MP e 75gr de pasta de celulose em folha transformada, mistura 3.

**Figura 4.85.** Secagem do cone truncado com 70° de curvatura. Fabricação do modelo com a mistura de pasta cerâmica, argila do tipo GRÉS 130 MP e 100gr de pasta de celulose em folha transformada, mistura 4.

**Figura 4.86.** Secagem do Modelo AM Aalto, em estufa, produzido com a mistura de pasta cerâmica, argila do tipo GRÉS 130 MP e 25gr de pasta de celulose em folha transformada, mistura 1.

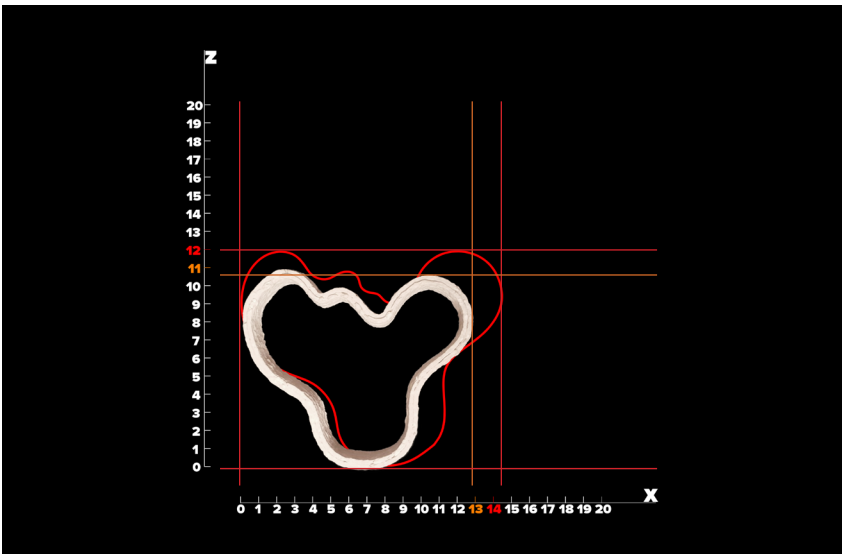




**Figura 4.87.** Secagem do cone truncado com 70° de curvatura. Fabricação do modelo com a mistura de pasta cerâmica, argila do tipo GRÉS 130 MP e 75gr de pasta de celulose em folha transformada, mistura 3.

**Figura 4.88.** Secagem do cone truncado com 70° de curvatura. Fabricação do modelo com a mistura de pasta cerâmica, argila do tipo GRÉS 130 MP e 100gr de pasta de celulose em folha transformada, mistura 4.

**Figura 4.89.** Secagem do Modelo AM Aalto, em estufa, produzido com a mistura de pasta cerâmica, argila do tipo GRÉS 130 MP e 25gr de pasta de celulose em folha transformada, mistura 1.



## Acabamento

No contexto de análise da superfície dos provetes produzidos com a mistura C — grés cerâmico e pasta de celulose transformada, verifica-se que quanto maior é a percentagem de celulose presente na mistura, maior é a sua resistência e a textura granulosa produzida na superfície. A pasta de celulose em folha transformada, quando anexada à celulose tem uma presença forte, sendo quase possível observar os diferentes grãos que a constituem. Na Figura 4.92, a peça central apresenta menor quantidade de celulose em folha transformada adicionada em comparação com a peça inferior.

Quanto à tonalidade e após a observação das peças produzidas com a mistura C, a introdução das fibras de celulose alterou consideravelmente a cor adotada pela mistura, esta de tons acastanhados passou a assumir um tom mais claro, como observado na Figura 4.91.

Em relação ao peso, é possível comprovar que a presença de fibras de celulose tende a diminuir o seu peso em comparação com a pasta cerâmica sem celulose. Quanto maior é a quantidade de fibras de celulose introduzidas, mais leves as peças ficam.



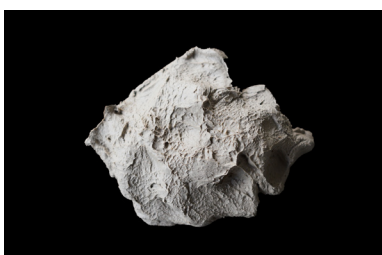
**Figura 4.90.** Acabamento final das taças truncadas, com as múltiplas misturas de estudo.

**Figura 4.91.** Acabamento final das peças produzidas com a mistura de pasta cerâmica e pasta de celulose em folha transformada.

**Figura 4.92.** Acabamento final das peças produzidas, a peça superior foi fabricada com a mistura de pasta cerâmica e sem pasta de celulose em folha transformada, a peça central com mistura de pasta cerâmica e 25gr pasta de celulose em folha transformada, mistura 1, por último a peça inferior com mistura de pasta cerâmica e 75gr pasta de celulose em folha transformada, mistura 3.



### 4.3.3. Mistura D



**Figura 4.93.** Demonstração do material em estudo, a argila.



**Figura 4.94.** Pasta acabada de celulose em folha branqueada.

Composta por pasta de celulose em pó branqueada e pasta de cerâmica Grés, esta mistura foi pensada com o propósito de resolver algumas das falhas observadas e enunciadas anteriormente, como falhas e deformações. A utilização da pasta cerâmica, tal como enunciado no subcapítulo anterior 4.3.2. Mistura C, precisa de atingir um teor de humidade entre os 33 a 35% para apresentar uma trabalhabilidade excelente quando aplicada no FA. Tendo em conta o observado na idealização da mistura B e B.1, supõem-se que a adição da pasta de celulose com o Grés possa apresentar resultados excelentes, funcionando bem como material fibroso. Esta abordagem resulta do teste de uma nova mistura, mistura D, cuja produção seguiu os passos da mistura C. dada a possibilidade de adicionar várias percentagens de celulose na pasta cerâmica, pensou-se em iniciar um estudo criando múltiplas misturas até se obter uma consistência interessante a explorar. Este estudo foi iniciado com a mesma quantidade de pasta cerâmica 1kg de argila. Após a definição da quantidade de argila em estudo, foi fundamental definir uma percentagem de celulose para se iniciar os testes, desta forma pensou-se que a melhor razão resultaria na adição de 2,5% de celulose em pó ao longo das misturas criadas, mas devido à leveza do material, acrescentou-se uma mistura inferior ao definido, possuindo uma percentagem de 1% de pasta de celulose. As misturas definidas são:

1. Mistura 1: 1kg de pasta cerâmica e 10gr de pasta de celulose;
2. Mistura 2: 1kg de pasta cerâmica e 25gr de pasta de celulose;
3. Mistura 3: 1kg de pasta cerâmica e 50gr de pasta de celulose;
4. Mistura 4: 1kg de pasta cerâmica e 75gr de pasta de celulose.

Por se tratar de uma pasta em pó, quando a preparação da mistura D foi necessário ter em atenção a sua manipulação, uma vez que a celulose em pó se encontra isenta de água, quando misturada à pasta de cerâmica, ela absorve parte da sua humidade, alterando consideravelmente o teor de humidade esperado e definido para garantir uma boa trabalhabilidade. Para controlar este fator, uma vez que o teor de humidade excelente atribuído ao Grés deve rondar os 33 a 35%, é necessário aumentar a percentagem de água, com isto definiu-se uma razão paramétrica que permitisse definir a quantidade de água a acrescentar para cada uma

das misturas. Para cada 5gr de celulose em pó, adicionou-se 6gr de água, resultando numa razão de 5 para 6:

1. Mistura 1: 1kg de pasta cerâmica, 10gr de celulose e 12gr de água;
2. Mistura 2: 1kg de pasta cerâmica, 25gr de celulose e 30gr de água;
3. Mistura 3: 1kg de pasta cerâmica e 50gr de celulose e 60gr de água;
4. Mistura 4: 1kg de pasta cerâmica e 75gr de celulose e 90gr de água;

Uma vez que o comportamento adotado pela mistura D se assemelha ao observado com a pasta cerâmica Grés, as propriedades quando em cru e após secagem são semelhantes entre si, como descrito na tabela.

	<b>Cru</b>	<b>Secagem</b>
<b>Retração</b>	4,5 a 6,5%	5 a 6,5%
<b>Humidade</b>	87 wt%	0 wt%
<b>Cor</b>	castanha	cinzenta
<b>Absorção de água</b>	100%	0 a 2%
<b>Resistência</b>	nula	elevada

**Tabela 4.09.** Demonstração das propriedades da pasta cerâmica e pasta de celulose em pó, com comparação entre o comportamento em cru e após secagem.



**Figura 4.95.** Pesagem de 1000gr de pasta cerâmica e anexação da água em falta para obtenção do teor de humidade pretendido.

**Figura 4.96.** Pesagem da percentagem da pasta de celulose em pó necessária.

**Figura 4.97.** Agregação de ambos os materiais e obtenção da mistura D.



## Impressão

Como já descrito no subcapítulo anterior 4.3.2. *Mistura C*, foram desenvolvidas cinco misturas de estudo, como ressaltado na tabela abaixo colocada. Todos os testes realizados utilizaram como base de comparação a mistura 1, composta por pasta cerâmica, para comprovar a diferenciação entre uma mistura sem e com celulose. Tal como nas anteriores misturas, estudou-se os mesmos parâmetros de estudo, a trabalhabilidade, exequibilidade e aplicabilidade no FA.

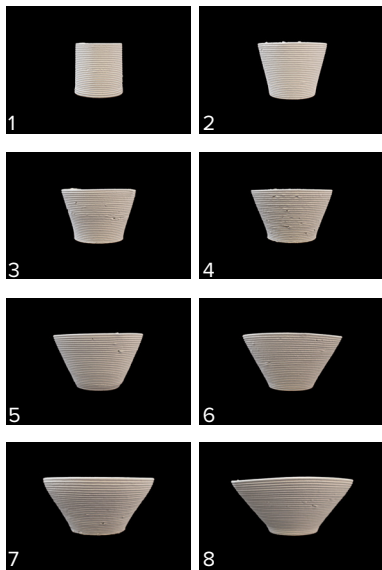
	Argila Grés 130 MP	Celulose em pó	Água anexada
Mistura 1	1Kg	0gr	0gr
Mistura 2	1Kg	10gr	12gr
Mistura 3	1Kg	25gr	30gr
Mistura 4	1Kg	50gr	60gr
Mistura 5	1Kg	75gr	90gr

A primeira fase de trabalho, semelhante ao descrito nos subcapítulos anteriores, resultou na validação dos parâmetros definidos, iniciando-se pela impressão dos provetes — cones truncados — como ilustrado na Figura 4.100. Todas as misturas definidas obtiveram um comportamento excelente, suportando inclinações até 50° de curvatura, como descrito na Figura 4.99. A mistura do Grés com pasta de celulose em pó consegue garantir uma impressão devido às propriedades que os grãos de celulose adquirem quando misturados com outro material. O comportamento da mistura D foi superior ao observado ao longo de todo o estudo individual com a mistura C.

Observado o excelente desempenho de resposta da mistura D na primeira fase discriminada, a segunda fase de trabalho resultou na produção do componente anteriormente referido — bloco Alveolus — com um grau de exigência superior ao colocado na fase anterior. Para testar a resistência da mistura, tendo como base de estudo os parâmetros lançados, foram fabricados dois blocos, um com a mistura 1 e outro com a mistura 2, com o objetivo de analisar o comportamento do bloco quando produzido com celulose e sem celulose, comparando a fissuração, deformação e retração das duas pastas. Ambas as misturas conseguiram responder bem no ato de produção, verificando-se uma maior resistência e maior granulidade na superfície da peça fabricada com a mistura 4, facto igualmente verificado no teste anterior — ver anexo 4 a 8.

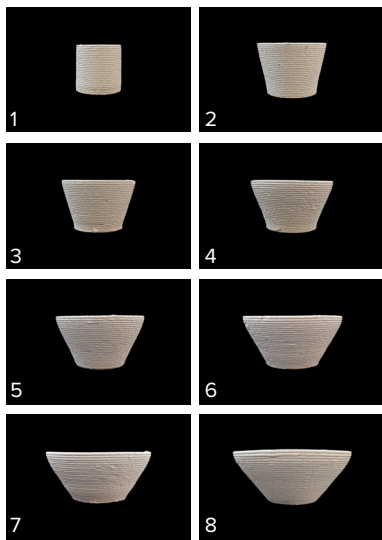
A celulose em pó ou folha, quando permanece em contacto com a argila, por um longo intervalo de tempo, tende a absorver grande parte da humidade presente na mistura, dificultando a extrusão contínua e homogênea da pasta. Esta quando utilizada para FA produz crateras sempre que ocorre uma interrupção no ato de impressão, como verificado na Figura 4.102. Em testes anteriormente realizados com a mistura C, pensava-se que este parâmetro só acontecia devido à granulometria dos grãos de celulose, ao contrário daquilo que inicialmente foi proposto,

**Tabela 4.10.** Demonstração das propriedades da pasta cerâmica e pasta de celulose em pó, com comparação entre o comportamento em cru e após secagem.



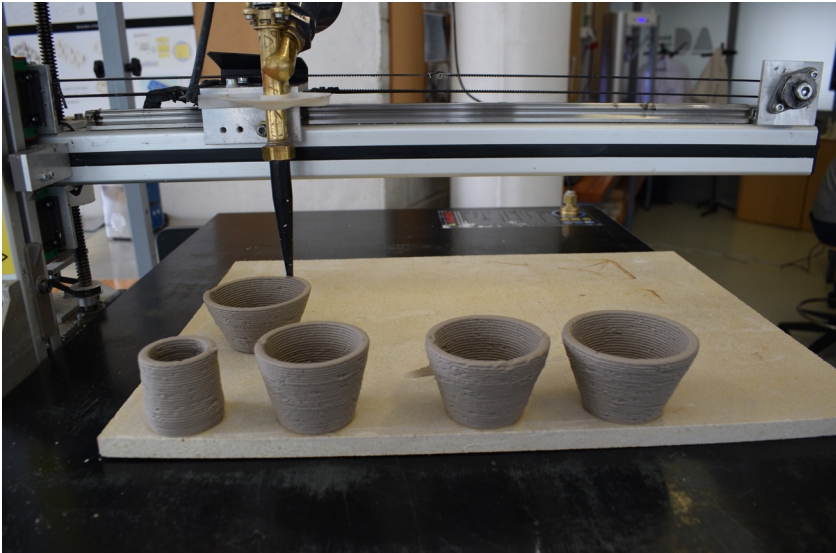
este fator deriva claramente redução do teor de humidade da mistura, que aquando o contacto entre a argila e celulose, cria zonas secas produzindo as crateras anteriormente referidas.

**Figura 4.98.** Primeira fase de trabalho, provetes produzidos com a mistura 1. (1) cilindro, (2) cone truncado com 20° de curvatura, (3) cone truncado com 25° de curvatura, (4) cone truncado com 30° de curvatura, (5) cone truncado com 35° de curvatura, (6) cone truncado com 40° de curvatura, (7) cone truncado com 45° de curvatura e por fim, (8) cone truncado com 50° de curvatura.



**Figura 4.99.** Primeira fase de trabalho, provetes produzidos com a mistura 4. (1) cilindro, (2) cone truncado com 20° de curvatura, (3) cone truncado com 25° de curvatura, (4) cone truncado com 30° de curvatura, (5) cone truncado com 35° de curvatura, (6) cone truncado com 40° de curvatura, (7) cone truncado com 45° de curvatura e por fim, (8) cone truncado com 50° de curvatura.

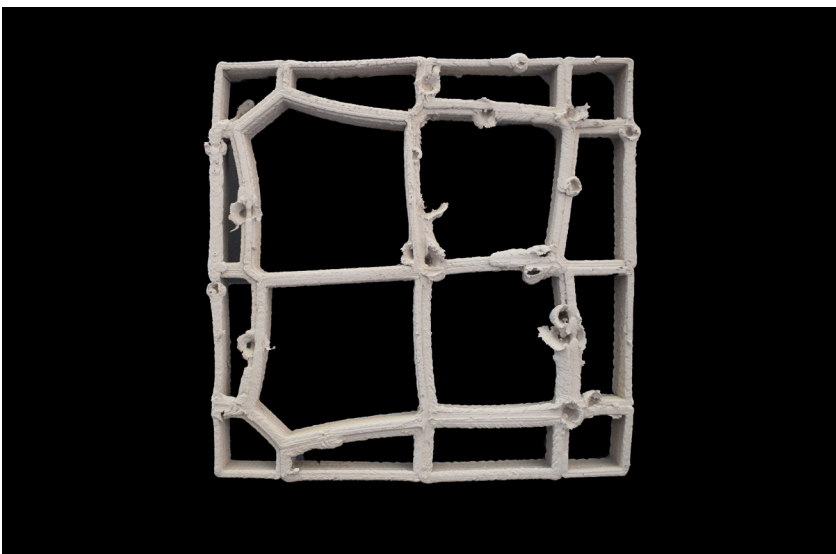
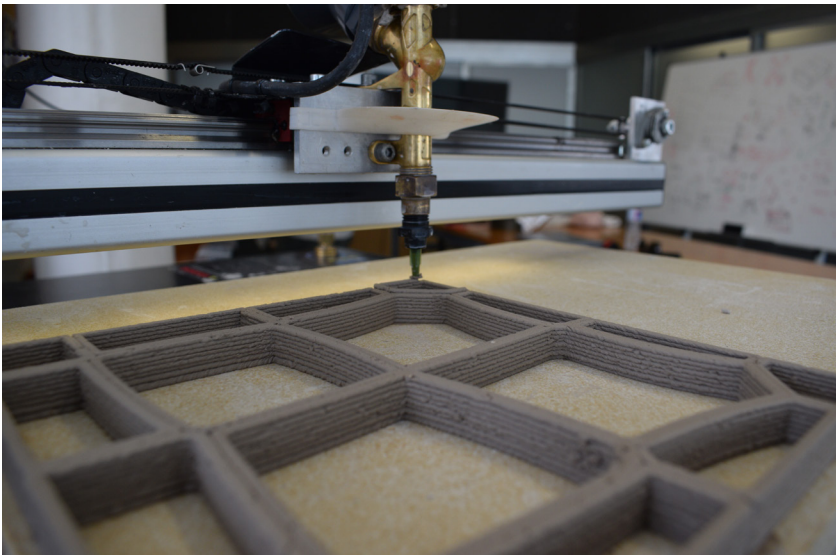




**Figura 4.100.** Fabricação dos provetes, cones truncados, para estudo da limitação de curvatura da mistura D. Impressão com a mistura de pasta cerâmica e 5% de celulose em pó, mistura 3.

**Figura 4.101.** Fabricação do bloco Alveolus. Impressão a mistura de pasta cerâmica e 2,5% de celulose em pó, mistura 2.

**Figura 4.102.** Fabricação do bloco Alveolus. Consequências de impressão pelo armazenamento da mistura de pasta cerâmica e celulose em pó. Observação das crateras.



## Secagem

**Tabela 4.11.** Demonstração das misturas idealizadas e possíveis índices de retração das taças truncadas para estudo da limitação da curvatura.

Como descrito anteriormente a fase de secagem diverge de mistura para mistura, o grés — diferente da celulose — para iniciar a secagem necessita somente de estar num espaço, controlado ou variável, para libertar a água presente na pasta. O comportamento observado com a pasta de cerâmica durante a secagem natural — ambientes variáveis — e secagem artificial — ambientes controlados — é diferente, isto porque independentemente do aditivo adicionado ao grés, se a variação de temperatura num ambiente variável é extrema, a retração da pasta poderá provocar alterações significativas na peça, como deformações excessivas e fissurações nos pontos de maior fragilidade. Como já enunciado no subcapítulo anterior — mistura C — é aconselhável a realização da secagem em estufa, a temperaturas baixas e constantes.

Analisando o comportamento dos testes produzidos, foi possível extrair algumas conclusões. O primeiro teste de estudo, a fabricação dos provetes — cones truncados — independentemente da quantidade de celulose adicionada ao grés, o índice de retração varia significativamente, aproximando-se da mistura 1 — grés sem celulose. A tabela ilustrada tem como objetivo demonstrar os materiais em estudo, a água adicionada para a concretização de cada mistura e posterior índice de retração do diâmetro de altura.

	Argila Grés 130 MP	Celulose em pó	Água Adicionada	Índice de retração do diâmetro	Índice de retração da altura
Mistura 1	1000gr	0gr	0gr	11%	11%
Mistura 2	1000gr	10gr	12gr	8%	16%
Mistura 3	1000gr	25gr	30gr	8%	16%
Mistura 4	1000gr	50gr	60gr	6%	19%
Mistura 5	1000gr	75gr	90gr	8%	25%

Tendo em conta todos os provetes produzidos na fase anterior, após a secagem, foi possível constatar que o índice de retração de cada mistura diverge consoante a percentagem de celulose anexada. A pesar de apresentar valores semelhantes como observado na tabela acima, quanto maior for a percentagem de celulose, menor é a retração observada, apesar de esta constar nos valores acima referenciados — tabela das propriedades da pasta. As variações verificadas entre as diversas misturas testadas devem-se sobretudo a vibrações durante a impressão e deformações causadas pela desidratação do material. Analisando o comportamento de cada pasta, a mistura 4 foi que menor índice de retração do diâmetro apresentou. Quando estudado o índice de retração da altura, verifica-se claramente uma variação altíssima entre as diferentes misturas, pois quanto maior é a percentagem de celulose na mistura, maior é o índice de retração em altura e este fator deve-se sobretudo ao peso que a celulose acrescenta ao grés.

Com a produção dos provetes, a verificação da limitação de impressão das misturas, o índice de retração e deformação foi pouco esclarecedor, demonstrando valores diferentes dos esperados. Para demonstrar o comportamento da mistura quando adicionada celulose em pó, depois de impressos os blocos Alveolus, como descrito anteriormente, catalogou-se o seu comportamento em cru e após secagem, com o objetivo de demonstrar qual o comportamento adotado pelas duas misturas estudadas no que toda à retração e deformação da pasta. A tabela abaixo mencionada tem como objetivo demonstrar a dimensão proposta para o desenvolvimento do bloco e a dimensão final após cozimento, relacionando com o peso.

Alveolus Block	Estado de secagem	Dimensão Inicial (cm)	Dimensão Final (cm)	Índice de Retração	Peso
Mistura 1	Seca	20x20x8	19x19x7	5,3%	1,200kg
Mistura 1	Cozida	20x20x8	17,5x17,4x6,5	14,3%	0,920Kg
Mistura 2	Seca	20x20x8	19x19x7	5,3%	1,000kg
Mistura 2	Cozida	20x20x8	17,5x17,4x6,5	14,3%	0,840kg

O primeiro teste referente ao bloco Alveolus com a mistura 1, foi produzido com uma mistura á base de grés cerâmico sem celulose, como anteriormente mencionado, seco à temperatura ambiente num espaço de 10 dias. Quando seco apresentava uma dimensão de 19x19x7cm, com um índice de retração de 5,3%. Com o cozimento do bloco, as dimensões passaram para 17,5x17,5x6,5cm apresentando um índice de retração de 14,3%. O segundo teste referente ao bloco Alveolus com a mistura 2, foi produzido igualmente à base de grés e pasta de celulose. Após a secagem o bloco apresentava uma dimensão de 19x19x7cm e índice de retração de 5,3%, este permaneceu igual ao verificado anteriormente. Quando cozidas apresentam uma dimensão de 17,5x17,5x6,5cm e índice de retração de 14,3%. A maior variação observação na produção de ambos os blocos foi a deformação das paredes das peças, estas são intensificadas na mistura 1, assim como o surgimento de possíveis fissuras nas zonas mais frágeis. Na mistura 2 com a adição de celulose, a deformação é claramente diminuída assim como possíveis fissurações. Com este estudo comprovou-se claramente que o índice de retração, com ou sem celulose é o mesmo, mas o comportamento da mistura a alterações de deformação ou fissuração é distinto, conseguem responder de forma excelente, com deformações mínimas, mais acentuadas nas paredes simples e fissurações inexistentes

Outro fator verificado, esta relacionado com a presença das fibras de celulose na mistura, quanto maior é a percentagem de celulose, mais leves se tornam as peças. Na tabela acima é possível observar que o bloco Alveolus seco, sem celulose apresenta um peso próprio de 1,200Kg enquanto que o mesmo bloco com celulose apresenta um peso de 1,000Kg. Já o bloco cozido sem celulose apresenta um peso próprio de 0,920Kg enquanto que o bloco cozido com celulose apresenta 0,840Kg.

**Tabela 4.12.** Demonstração do comportamento dos blocos Alveolus quando fabricados com misturas sem e com celulose, observando a sua dimensão inicial e final, o índice de retração e posterior peso dado o estado de secagem da peça.



**Figura 4.103.** Secagem do cone truncado com 70° de curvatura. Fabricação do modelo com a mistura de pasta cerâmica sem celulose.

**Figura 4.104.** Secagem do cone truncado com 70° de curvatura. Fabricação do modelo com a mistura de pasta cerâmica e 1% de pasta de celulose em pó, mistura 1.

**Figura 4.105.** Secagem do cone truncado com 70° de curvatura. Fabricação do modelo com a mistura de pasta cerâmica e 2,5% de pasta de celulose em pó, mistura 2.

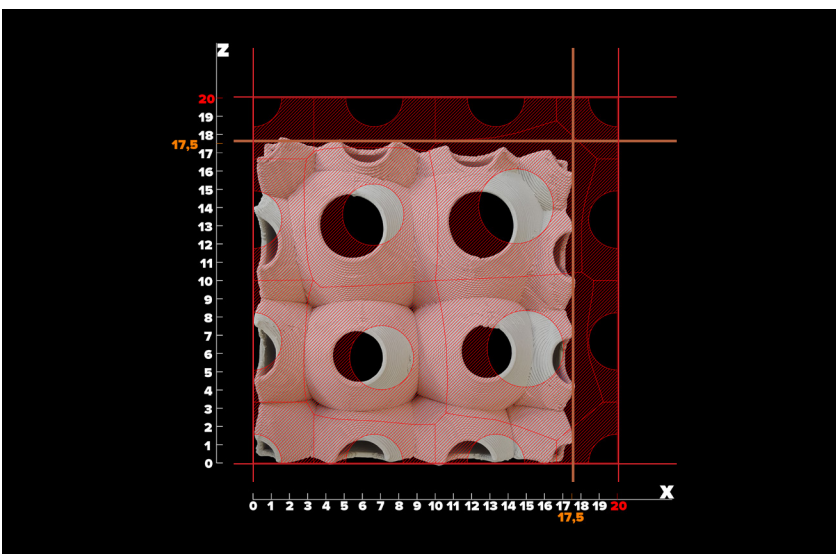




**Figura 4.106.** Secagem do cone truncado com 70° de curvatura. Fabricação do modelo com a mistura de pasta cerâmica, argila do tipo GRES 130 MP e 5% de pasta de celulose em pó, mistura 3.

**Figura 4.107.** Secagem do cone truncado com 70° de curvatura. Fabricação do modelo com a mistura de pasta cerâmica, argila do tipo GRES 130 MP e 7,5% de pasta de celulose em pó, mistura 4.

**Figura 4.108.** Secagem do bloco Alveolus. Esto da retração da peça com pasta cerâmica e pasta de celulose em pó.



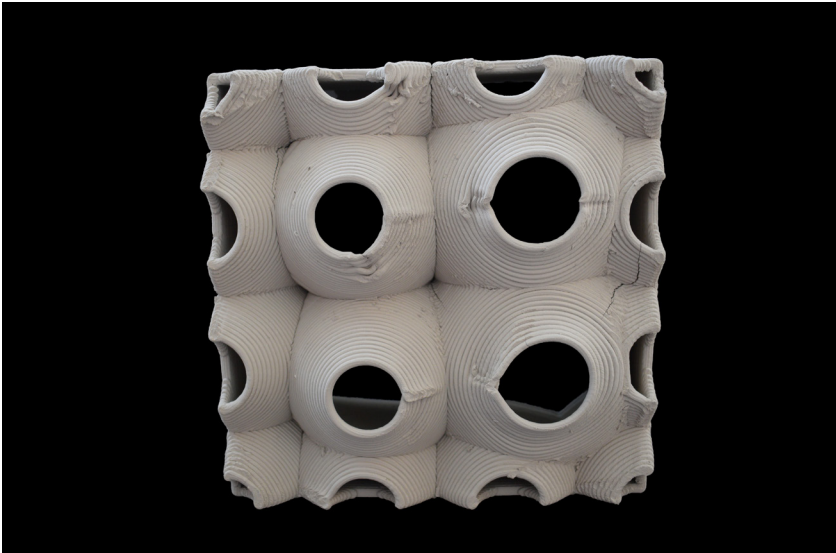
## Acabamento

No contexto de análise da superfície dos provetes preparados com a mistura D — grés cerâmico e pasta de celulose em pó — verifica-se que quanto maior é a percentagem de celulose presente na mistura, maior é a textura produzida, uma superfície mais granulosa assim como maior é a resistência adquirida por esta.

Tal como na mistura C, a presença de fibras de celulose na pasta de cerâmica tende a alterar a sua tonalidade, passando de tons acastanhados para tons mais claros.

Em relação ao peso, é possível comprovar que a presença de fibras de celulose tende a diminuir o seu peso em comparação com a pasta cerâmica sem celulose. Quanto maior é a quantidade de fibras de celulose introduzidas, mais leves as peças ficam.

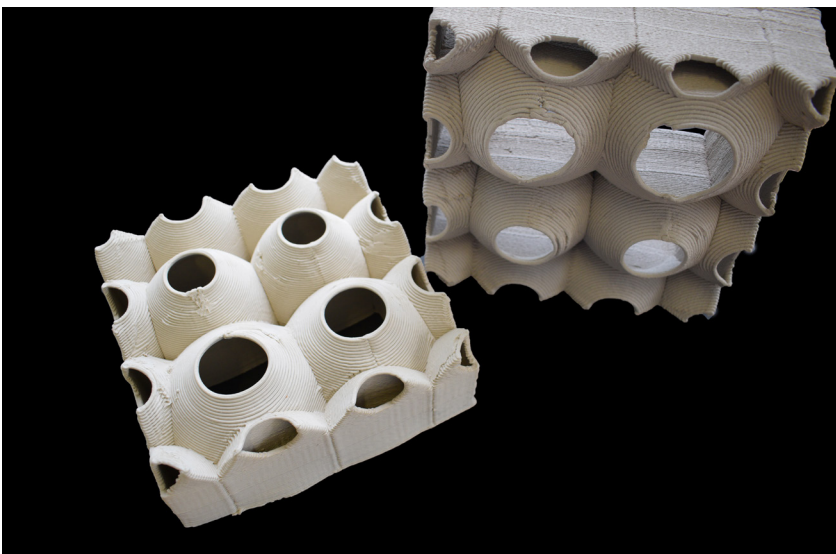
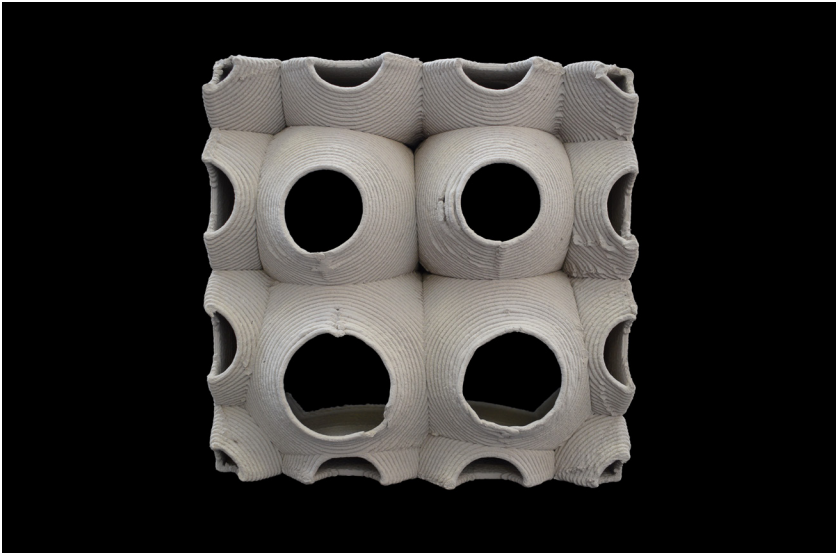
A presença das fibras de celulose na mistura diminui consideravelmente as malformações obtidas durante a secagem. Na figura 4.107, o bloco foi cozido pelas alterações e retrações encontra-se fissurado, enquanto que na Figura 4.108, o bloco devido à presença de fibras de celulose, mesmo com um tempo de cura inferior ao enunciado acima consegue obter um acabamento com uma qualidade superior.



**Figura 4.109.** Bloco Alveolus produzido com pasta de argila sem celulose. Visualização de deformações e fissurações. Aspeto mais cuidado.

**Figura 4.110.** Bloco Alveolus produzido com pasta de argila e celulose em pó. Visualização de deformações geradas pela impressão. Aspeto menos cuidado.

**Figura 4.111.** Secagem do bloco Alveolus. Peça deitada cozida, com uma mistura de pasta cerâmica sem celulose, peça levantada seca, com uma mistura de pasta cerâmica e celulose.



## 4.4.4. Conclusões

Testados os materiais e desenvolvidas as misturas, a ideia era realizar uma comparação entre o comportamento observado com pasta de argila sem celulose e pasta de argila com os dois tipos de celulose. O presente subcapítulo pretende demonstrar aquela que mais vantagens possui para aplicação e produção de protótipos rápidos, realizando uma breve análise conclusiva entre as duas possibilidades. Sintetizadamente aquela que mais vantagens possui é a mistura D, composta por pasta cerâmica e pasta de celulose em pó. Para isso foi analisado, o modo de preparação, a fluidez da pasta, a impressão, a secagem, a retração, a deformação e o acabamento final.

1.Tendo em conta o **modo de preparação da pasta**, a mistura C é aquela que maior dificuldades apresentou no ato de execução. É notório que antes da colocação da pasta de celulose, tanto na mistura C como D, a argila necessita de ser previamente misturada com água, aumentando o seu teor de humidade para garantir uma boa fluidez da mistura. Visto que a pasta de celulose em folha, anexada à mistura C necessita de sofrer uma transformação prévia, o teor de humidade nunca é o mesmo, pelo que quando misturada com argila pode aumentar o seu teor de humidade ou vice-versa.

2.A **fluidez da pasta**, depende claramente do tipo de pasta de celulose utilizada e da percentagem de água adicionada à argila. Quando anexada a celulose na mistura C, se esta possuir um elevado teor de humidade então a fluidez da pasta vai aumentar consideravelmente, se esta estiver muito seca, absorverá a humidade presente na argila, fazendo com que esta perca fluidez. Quando adicionada a celulose na mistura D, o teor de humidade da argila deve ser superior ao utilizado na mistura sem celulose, pois a celulose em pó está isenta de humidade e absorve a presente na pasta de argila. Para melhor contornar este fator, a fluidez da pasta de argila deve ser superior ao proposto para a mistura sem celulose.

3.No ato de **impressão da pasta**, a mistura D é aquela que melhor comportamento e trabalhabilidade apresenta. Devido à transformação da celulose em folha, pela falta de homogeneidade, quando esta é anexada à argila, se os grãos de celulose apresentarem granulometrias superiores ao bico de extrusão, a fabricação dos modelos é interrompida,

levando a produtos com pouca qualidade de impressão. Este fator também é verificado quando os grãos de celulose se encontram isentos de água, assumindo um estado sólido e rígido.

4.A **secagem** foi um dos parâmetro de estudo em que as duas misturas responderam de igual forma. Para se realizar a secagem dos objetos produzidos, estes necessitam de uma secagem prévia, sendo aconselhado a secagem em ambientes controlados para um melhor controle sobre o índice de retração das peças. É necessário ter em conta as variações térmicas excessivas a que a peça esta sujeita, para que não sofram fissurações, deformações, retrações, entre outros aspectos. Após a secagem, são cozidas a temperaturas superiores a 1260°C.

5.A **retração das peças**, em ambas as misturas deu-se de igual forma. A presença das fibras de madeira elimina possíveis deformações e fissurações, mas a retração do material é igual à pasta de argila sem celulose. A retração dá-se aquando a perda de volume da mistura o que resulta na perda de concordância entre as dimensões dos modelos tridimensionais, modelos impressos e finais, após secagem e cozedura.

6.A **deformação** das peças produzidas com ambas as misturas é atenuada com a presença de fibras de celulose, tendo como base de comparação as deformações causadas na pasta de argila sem celulose. Geralmente a deformação é causada pela má secagem da peça. Quando esta se encontra sujeita a ambientes variáveis, as peças tendem a deformar consideravelmente.

7.O **acabamento** das misturas é quase semelhante, verificando-se algumas divergências após cozedura. Nas peças impressas com a mistura C, após cozedura, os grãos de celulose mostra pequenos grãos de areia esbranquiçados, sendo claramente visíveis nas peças produzidas. Nas peças impressas com a mistura D, após cozedura, a presença de fibras de celulose é quase imperceptível. Quanto maior é a percentagem de celulose em ambas as misturas, menos cuidada é a peça.

Analisando os diversos parâmetros entre ambas as misturas em estudo, mistura C - pasta cerâmica e pasta de celulose em folha transformada - e mistura D - pasta de cerâmica e pasta de celulose em pó, é possível concluir que a mistura que apresenta mais potencialidades de aplicabilidade para fabricação de elementos arquitetónicos, tirando partido das técnicas de fabrico aditivo é a mistura D. Ao longo do estudo individual de cada mistura, todos os parâmetros mencionados foram estudados com um elevado rigor. Ambas as misturas são potenciais para a aplicação no FA, sendo o maior ponto de contenção entre elas a utilização da pasta de celulose em folha, esta complexifica a trabalhabilidade da mistura e a tentativa de obtenção de um modelo cuidado e limpo. Este fator já foi comprovado anteriormente quando o estudo das pastas no subcapítulo 4.2. *A celulose e o amido*. A pasta de celulose em pó apresenta um comportamento superior à pasta de celulose em folha, sendo que a resposta desta é superior quando anexada à mistura C que quando a idealização da mistura A.



**Figura 4.112.** Peça impressa com argila e pasta de celulose em folha. Observação dos diferentes grãos de celulose presentes na mistura.

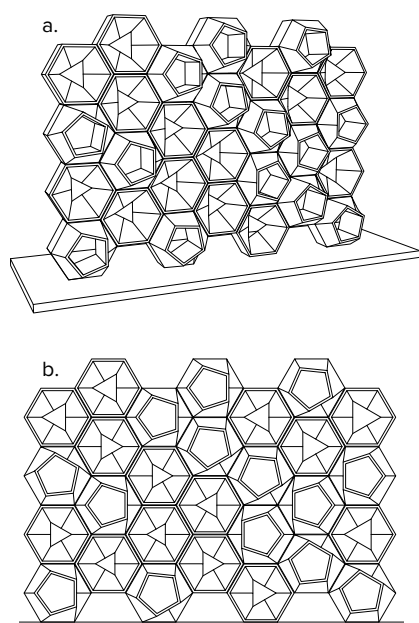
**Figura 4.113.** Peça impressa com argila e pasta de celulose e pó. Impressão mais limpa e cuidada. Indistinção dos grãos em pó de celulose presentes na mistura.

**Figura 4.114.** Acabamento, após cozedura, da mistura C. Observação dos grãos de celulose comparados a pequenos grãos de areia.





## 5. Protótipo de uma parede



**Figura 5.01.** Protótipo de uma parede, amostra do estudo de caso.  
a. Axonometria exemplificativa da amostra escolhida para prototipagem.  
b. Plano frontal da amostra escolhida para prototipagem.

Como prova de conceito propõem-se um protótipo de uma parede — a Kusudama Wall — um sistema de blocos de parede modulares e regulares. É o caso de estudo desta investigação e pretende pôr em prática num simples modelo todos os resultados obtidos.

O projeto aqui retratado tem ainda o propósito de expor as diferentes misturas alcançadas, o seu comportamento e a conjugação entre ambas as pastas. Com a anexação das misturas, o maior desafio observado está relacionado com a diversidade de retração ao longo das misturas, pois a retração verificada nas misturas com celulose é totalmente dispare do verificado nas misturas com argila, e o seu comportamento no ato de impressão. Cada mistura possui a sua própria identidade e para criar uma boa modelação entre ambos foi necessário alterar as dimensões, o seu comprimento e altura, por forma a que após a secagem todas elas possuam o mesmo tamanho.

Este sistema de projeto, para além da componente modular para a composição de paredes, prevê ainda a customização de aberturas nos módulos, ou blocos, bem como variações na sua profundidade. Considerou-se ainda um sistema de ligações por encaixe. A introdução do estudo dos encaixes foi um tema interessante, pois foi necessário estudar o seu comportamento para se conseguir modelar um encaixe que funcionasse de igual forma em todas as misturas.

O aspeto mais interessante observado, é a conjugação das diversas misturas sobre a mesma base de trabalho, o protótipo de uma parede. Nenhuma peça é igual, possuindo todas a sua identidade.



## 5.1. Ideial|Conceito



**Figura 5.02.** Kusudama, Origami Japonês, com caráter geométrico e 30 módulos piramidais triangulares, Maria Sinayskaya, 2010. Retirado do site: [www.goorigami.com](http://www.goorigami.com)



**Figura 5.03.** Kusudama, Origami Japonês, com caráter geométrico e 30 módulos piramidais pentagonais, Ekaterina Lukasheva, 2014. Retirado do site: [www.flickr.com](http://www.flickr.com)

Um Kusudama é um origami japonês criado a partir de múltiplas unidades piramidais idênticas, dobradas em papel, que quando juntas através dos seus pontos formam uma esfera. Podem originar formas geométricas, eventualmente extrapoláveis para formas e espaços de caráter arquitetônico.

A ideia base aplicada no desenvolvimento deste estudo de caso, surgiu tendo em conta a multiplicação de módulos piramidais, sejam estes pentagonais ou triangulares, que quando associados originam a parede de estudo. A base provem da mesma forma, um hexágono regular, de onde partem as pirâmides, afuniladas para o exterior ou interior do mesmo. Esse mesmo hexágono origina as paredes para suporte dos distintos blocos.

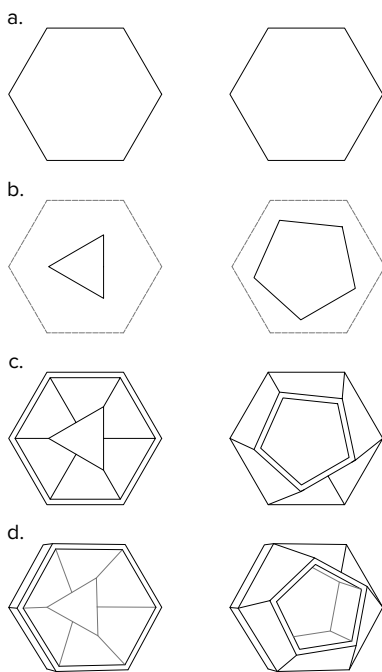
A grelha de hexágonos é dividida em dois componentes, os módulos piramidais superiores, de onde parte uma pirâmide com base hexagonal e termina numa superfície pentagonal e os módulos piramidais inferiores, de onde parte uma pirâmide de igual forma, terminando numa superfície triangular. Estes são intercalados entre si, formando um padrão de cheios e vazios. Todos os blocos são truncados, possuindo uma abertura que pode funcionar em distintos ambientes.

A variação criada nesta parede dá-se ao nível das aberturas dos diversos módulos piramidais, sendo que a sua base de execução mantém-se sempre igual.





## 5.2. Definição do modelo computacional paramétrico

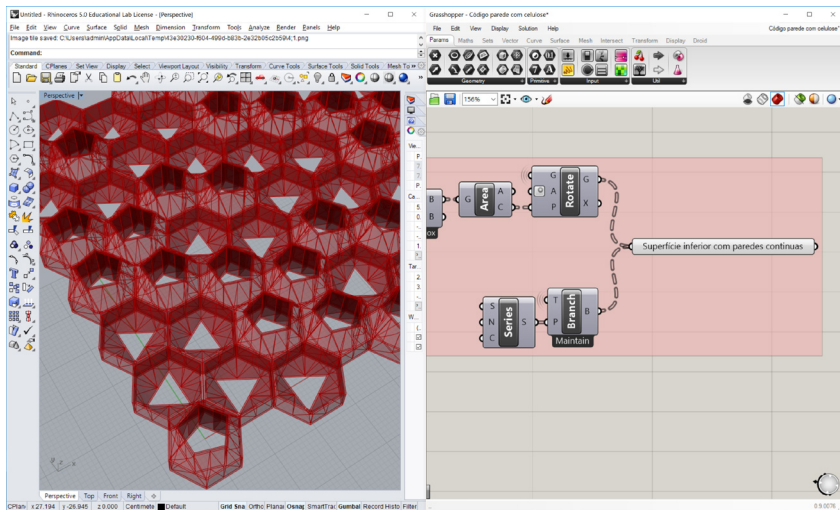


**Figura 5.04.** Desenvolvimento das peças a partir de três formas geométricas regulares. a.geração da forma hexagonal exterior, b.geração da forma triangular e pentagonal interior, c.geração do bloco tendo em conta as geometrias e d.axonometria do bloco definido.

O presente subcapítulo visa expor o processo de desenvolvimento do modelo estudo de caso, gerado a partir de modelação computacional. Este estudo de caso pretende incorporar os resultados obtidos anteriormente, com esta finalidade propôs-se um modelo de desenho paramétrico para a concepção de paredes constituídas por blocos hexagonais regulares, mas com variações de forma interiores.

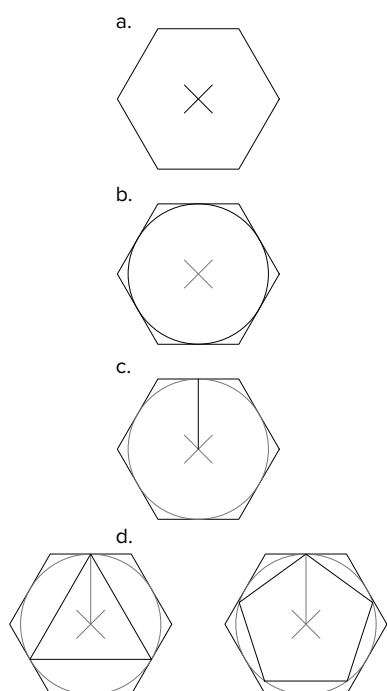
O modelo desenvolvido é muito simples, gerado a partir de três formas geométricas regulares, o hexágono, o pentágono e o triângulo. O hexágono é a forma base de desenho da parede, permitindo assim uma constante manipulação das peças e sua multiplicação, com isto foi criada uma grelha regular através da multiplicação dos mesmos e dividida em dois grandes grupos, um primeiro correspondente aos triângulos e um segundo aos pentágonos. A criação dos dois grupos permitiu que se desenvolvessem dois tipos de blocos, um que atribuiria aos blocos inferiores e o segundo aos blocos superiores. O primeiro grupo, definido por peças triangulares inferiores apresenta uma geometria mais simples que o segundo grupo, que recorre a duas formas geométricas em que uma é a metade da outra - o triângulo e o hexágono. Já o grupo dois, constituído por peças pentagonais superiores, apresenta uma geometria um pouco mais complexa, pela utilização de duas formas geométricas sem qualquer razão matemática - o pentágono e o hexágono. Todos os blocos possuem aberturas, e é a variação da dimensão das aberturas destas aberturas que introduz uma maior diversidade entre os blocos, e a respectiva parede que compõem. Esta variação decorre pela definição de pontos de influência, quanto maior for a proximidade dos blocos com esses pontos, menor é a abertura, simulando uma variação que decorre da necessidade de encerramento de um paramento por motivos como privacidade ou sombreamento. A agregação destes dois blocos gera um padrão de cheios e vazios.

Para geração o modelo computacional em Grasshopper, dividiu-se este estudo de caso em três fases de trabalho, a primeira correspondente à geração da malha hexagonal, pentagonal e triangular e a geração das paredes, a segunda, para o desenvolvimento das pirâmides truncadas inferiores (peças triangulares inferiores), grupo um, e por fim, a terceira para o desenvolvimento das pirâmides truncadas superiores (peças pentagonais superiores), grupo dois.



**Figura 5.05.** Interface gráfico do ambiente de trabalho do Rhinoceros (esquerda) com Grasshopper (direita), onde se ilustra a geração de um conjunto de blocos hexagonais (em Rhinoceros) e uma parte do respetivo modelo computacional (em Grasshopper).

## 5.2.1. Geração da malha hexagonal e suas variações



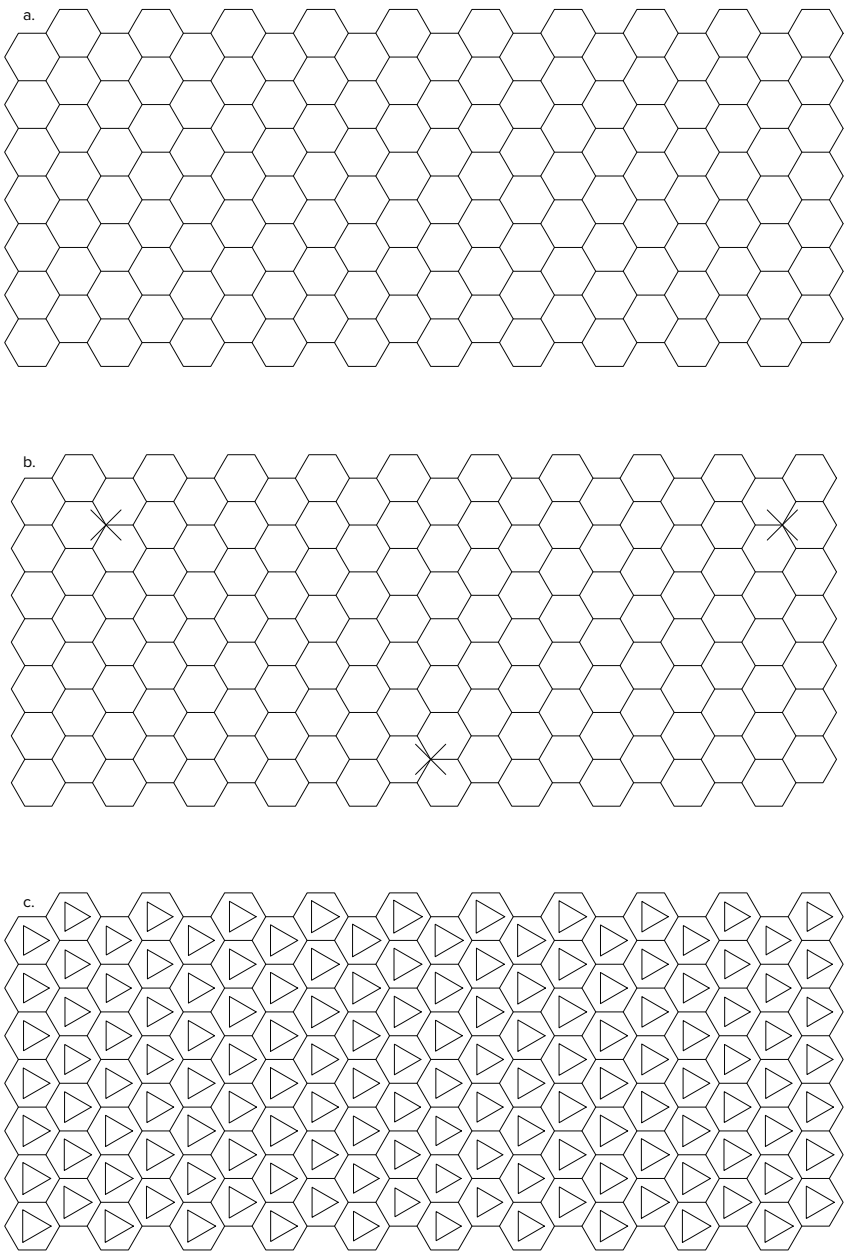
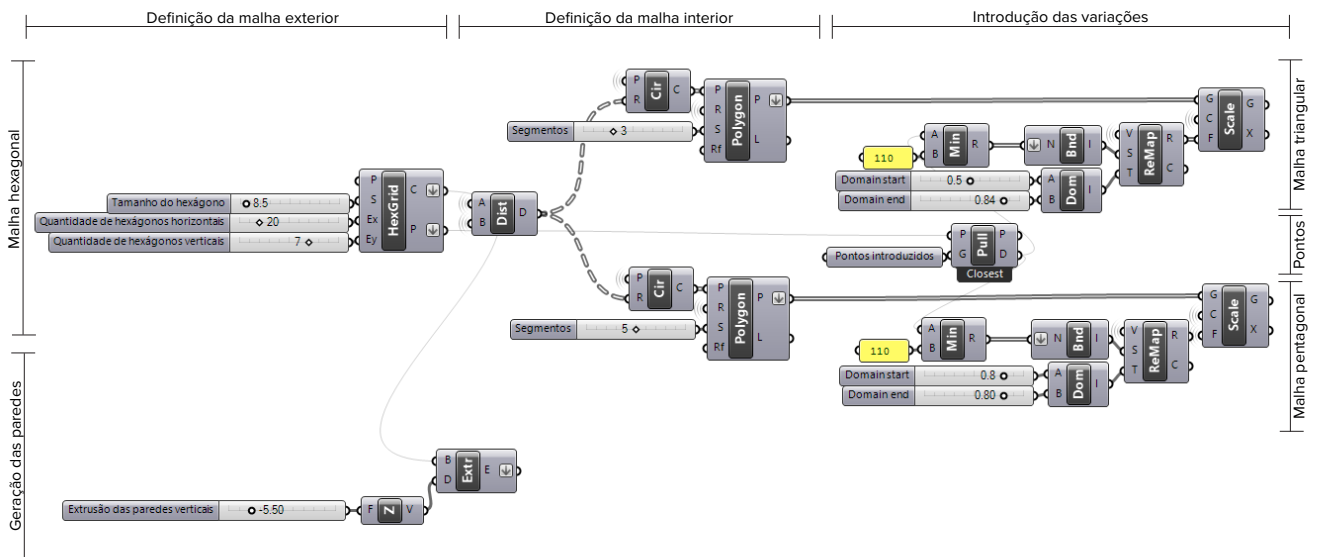
**Figura 5.06.** Inserção dos polígonos, triângulo e pentágono, dentro da geometria base de estudo o hexágono. a.Definição do centróide do hexágono, b.Inserção de uma circunferência no interior, c.Definição do raio desde o centróide até aos pontos médios das laterais do hexágono e d.Colocação dos polígonos no interior da circunferência com raio igual à distância entre o centróide e os pontos médios das laterais do hexágonos.

A primeira fase de trabalho é composta pela definição de uma malha hexagonal, em que todos os seus módulos possuem a mesma dimensão. Esta malha é constituída por sete peças que definem a sua altura e vinte peças que dão origem ao comprimento total da parede. É também nesta fase que se introduzem as variações que mais tarde definirão a geometria das paredes e a geração das duas malhas - triangular e pentagonal - para a produção dos blocos seguidamente enunciados. Para a posterior geração dos dois blocos é necessário também definir qual a altura necessária para a montagem da parede.

O principal objetivo desta fase de trabalho é gerar uma malha que possa ser facilmente alterada pela introdução de diversos parâmetros, como a dimensão individual de cada hexágono, a quantidade de peças que formam o comprimento e a altura da parede e por fim a altura atribuída a cada um dos blocos.

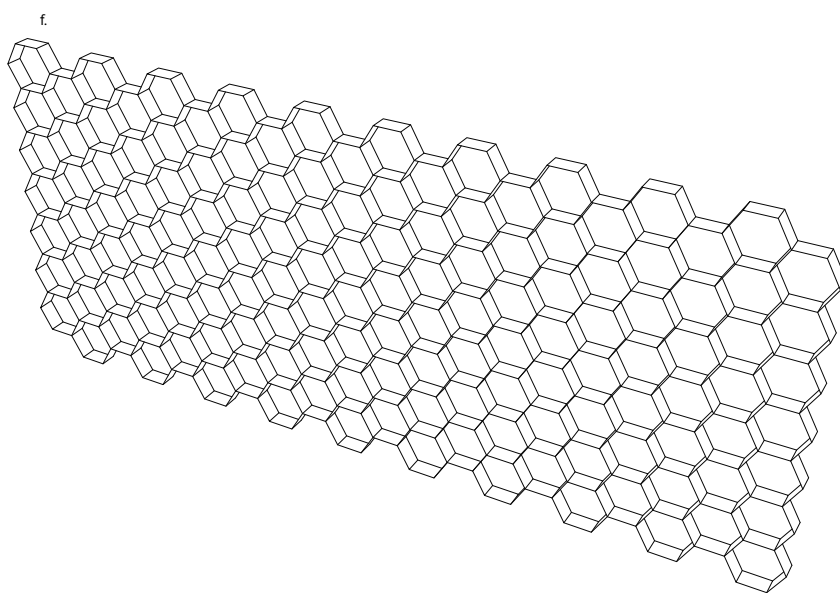
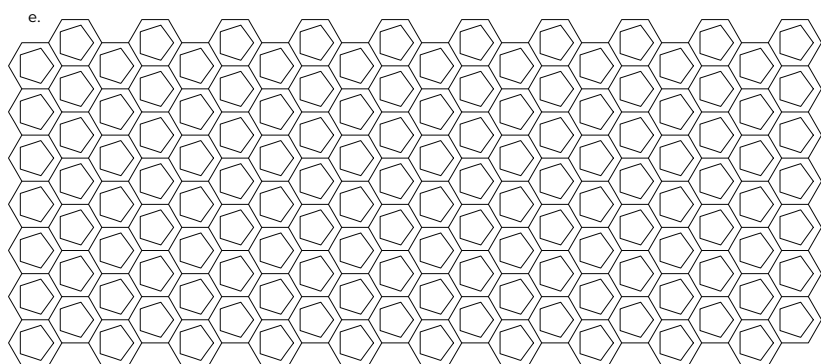
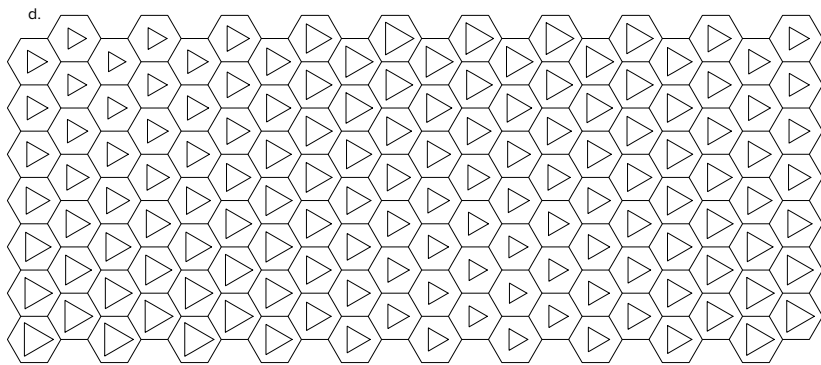
Para a geração da malha hexagonal e as suas variações, dividiu-se o código em três etapas distintas. A primeira etapa corresponde à definição da malha exterior, uma malha hexagonal, onde se faz variar a dimensão de cada hexágono, a quantidade de peças em X - comprimento - e quantidade de peças em y - altura, Figura 5.08 (a). Nesta etapa também se introduziu a dimensão que se pretende dar à altura de cada bloco através de uma extrusão em direção oposta, Figura 5.08 (f). A segunda etapa corresponde à definição da malha interior, através da definição de dois polígonos - triângulo e pentágono - esta foi gerada tendo em conta a dimensão proposta para a malha hexagonal, onde se introduz ambas as geometrias no interior de cada hexágono, como ilustrado na Figura 5.06. Definidas as duas malhas interiores, Figura 5.08 (c) e (e), a terceira etapa introduz em cada uma delas uma homotetia, uma variação no tamanho de acordo com a proximidade dos seus centróides aos pontos colocados aleatoriamente na malha hexagonal, Figura 5.08 (b). Quanto maior é a proximidade aos pontos, mais pequenas são as geometrias, quanto maior é o seu distanciamento maior é a abertura das geometrias, Figura 5.08 (d).

O código ilustrado na Figura 5.07, demonstra claramente os passos anteriormente enunciado, dividido por etapas de trabalho.



**Figura 5.07.** Código grasshopper, Desenvolvimento da malha hexagonal e suas variações e Geração das paredes hexagonais. Código gerado para as misturas à base de celulose.

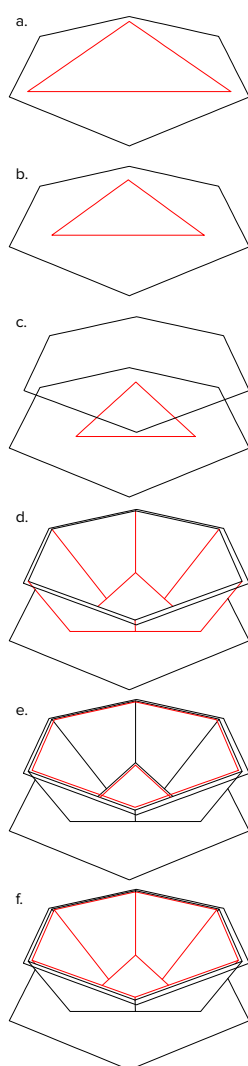
**Figura 5.08.** Geração da malha hexagonal e as suas variações. a.Definição da malha exterior hexagonal, b.Colocação de três pontos aleatórios na malha hexagonal, c.Definição da malha interior triangular, sem variações, d.Introdução das variações de escala da malha interior triangular, tendo em conta a colocação dos três pontos aleatórios definidos anteriormente, e. Definição da malha interior pentagonal, sem variações e f.Extrusão das paredes exteriores hexagonais.







## 5.2.2. Geração das pirâmides truncadas inferiores



**Figura 5.09.** Geração das superfícies exteriores. a.Definição da malha hexagonal e triangular. b.Variação da dimensão da malha triangular. c.Movimentação da malha triangular para o plano de base da peça. d.Geração da superfície interior. e. Distância entre superfícies. f.Geração da superfície exterior.

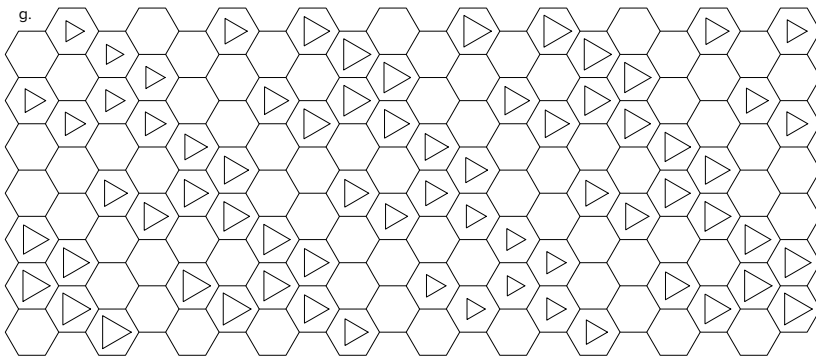
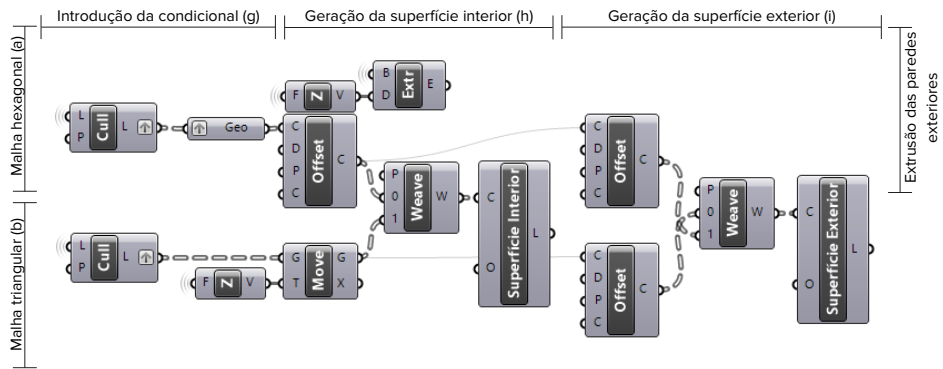
A segunda fase do trabalho é composta pela geração das superfícies exteriores, definidas por um hexágono e um triângulo – as pirâmides truncadas inferiores - a geração das paredes internas, através da extrusão das arestas pertencentes à superfície gerada anteriormente para um melhor comportamento e resistência, e por fim, a rotação das pirâmides truncadas inferiores.

Esta fase de trabalho foca-se essencialmente na definição as pirâmides truncadas inferiores — abertura triangular — com o objetivo de gerar uma superfície com duas bases diferentes, uma geometria com seis lados — hexágono — e outra com três lados — triângulo.

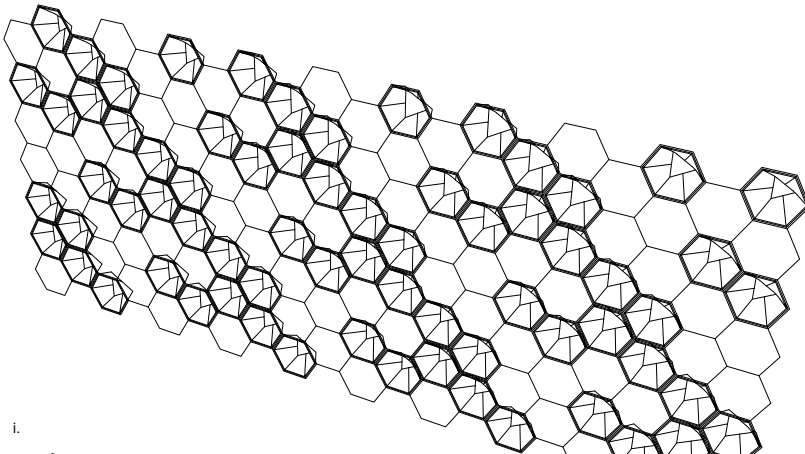
### 1.Geração das superfícies exteriores

Para a geração das superfícies exteriores dividiu-se o código GH em três etapas distintas. A partir da informação anteriormente descrita, para a definição da malha triangular variável, esta primeira etapa de estudo foca-se essencialmente na definição de uma nova malha, introduzindo uma condicional matemática, na qual é possível eliminar através de um padrão um conjunto de elementos que definem a malha - Padrão True e False, como ilustrado na Figura 5.11 (g), conseguiu-se gerar setenta pirâmides truncadas inferiores e setenta pirâmides truncadas superiores, aleatoriamente e segundo uma razão paramétrica.

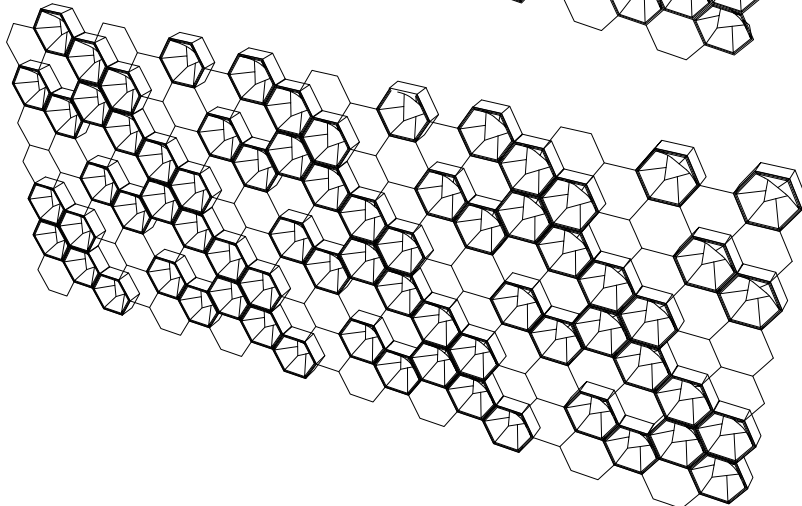
A etapa seguinte resulta na geração da superfície interior utilizando como base ambas as listas padronizadas anteriormente, Figura 5.09 (b). Cada superfície gerada parte de uma base hexagonal e termina numa base triangular, Figura 5.09 (c). Uma vez que o intuito destas superfícies era a criação de uma geometria afunilada para o interior, moveu-se a malha triangular para a base das paredes hexagonais, for forma à superfície ter a mesma altura que a parede, Figura 5.09 (c). Tendo em conta que uma só superfície podia gerar resistência e trabalhabilidade reduzida, na terceira etapa, definiu-se uma segunda superfície com o intuito de aumentar a força da peça, Figura 5.09 (f).



g.



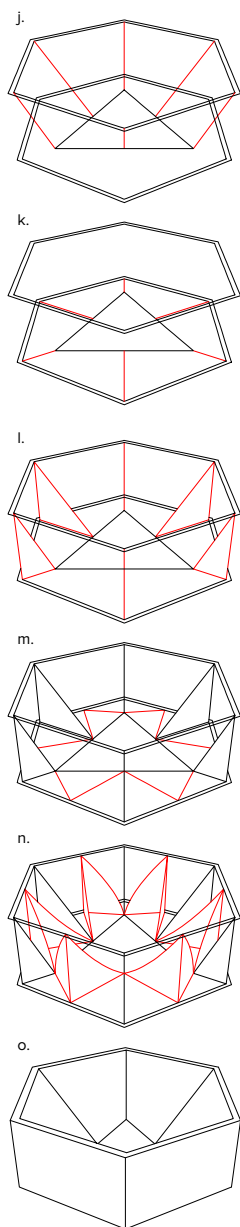
h.



i.

**Figura 5.10.** Código grasshopper, Desenvolvimento das pirâmides truncadas inferiores. Código gerado para as misturas à base de celulose.

**Figura 5.11.** Geração das pirâmides truncadas inferiores. g.Introdução de uma condicional para eliminação de metade dos elementos que definem a malha triangular. h. Geração das duas superfícies das pirâmides truncadas inferiores. i. Geração do bloco das pirâmides truncadas inferiores sem inclusão de estrutura interna.



**Figura 5.12.** Geração das paredes internas. j. Seleção das arestas da superfície anteriormente gerada. k. Projeção das arestas para o plano base. l. Extrusão das paredes. m. Geração das paredes internas secundárias de apoio às desenhadas. n. Extrusão das paredes internas secundárias. o. Geração do Bloco.

## 2. Geração das paredes internas

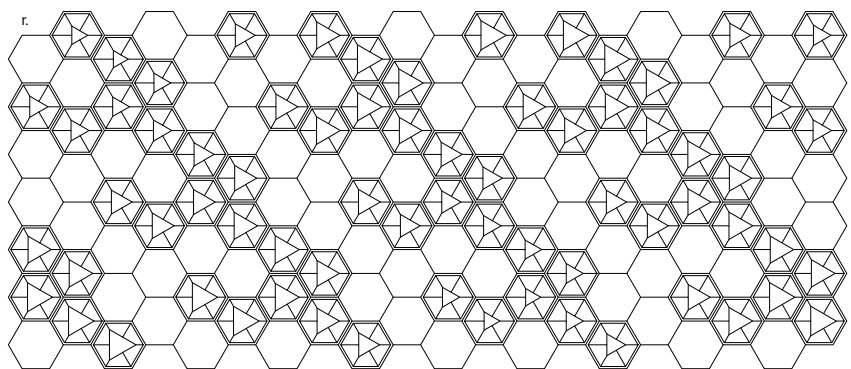
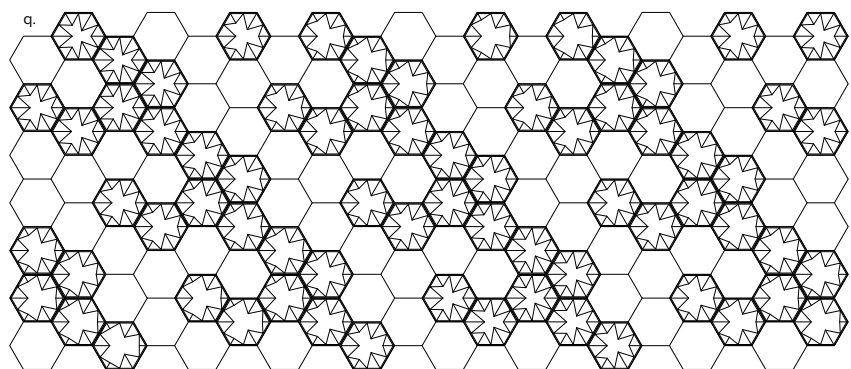
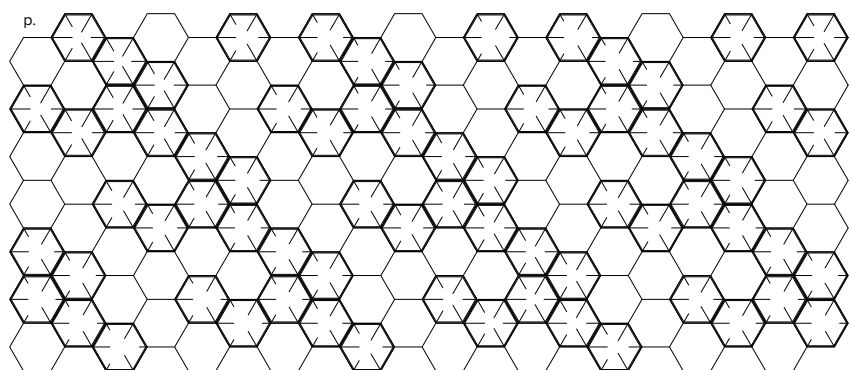
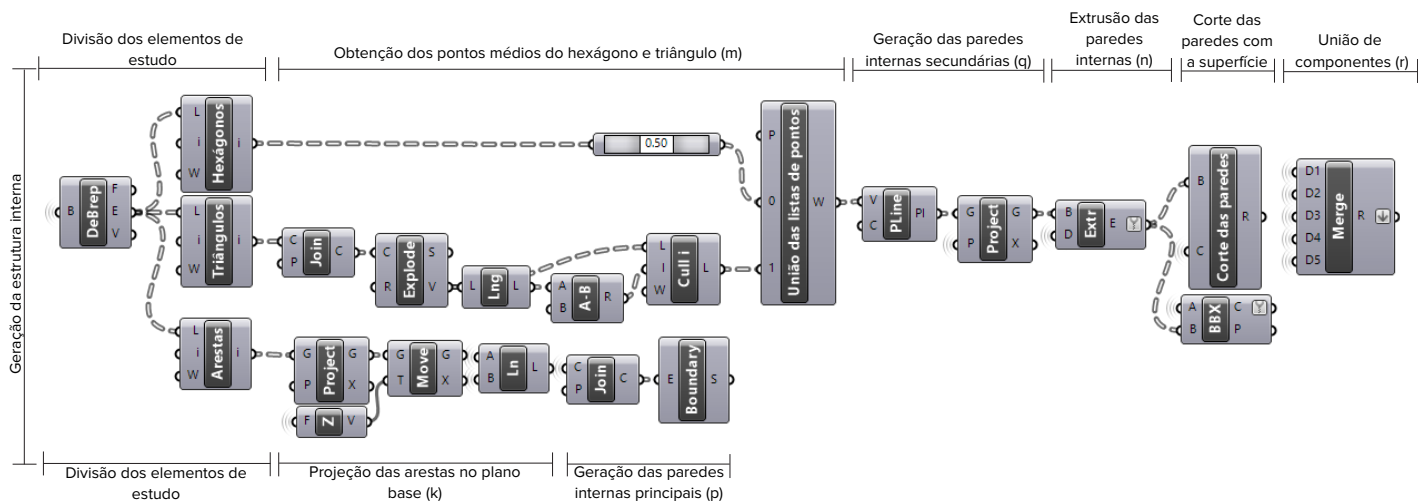
Gerada a superfície com base superior hexagonal e base inferior triangular, passou-se ao desenvolvimento das paredes internas. Esta fase é dividida em duas etapas, a geração das paredes internas principais e a geração das paredes internas secundárias.

Para o seu desenvolvimento recorreu-se à divisão dos elementos pertencentes à superfície exterior gerada anteriormente. Os componentes foram divididos em três grupos, as arestas do hexágono, as arestas do triângulo e as arestas da superfície gerada na etapa 1, Figura 5.12 (j). Para a definição das paredes internas principais, recorreu-se à seleção das arestas da superfície, que se projetaram no plano de base do bloco, Figura 5.12 (k). Uma vez obtidas as arestas diagonais e as arestas de base, estas foram unidas e transformadas numa superfície vertical independente, Figura 5.12 (l). Em seguida, passou-se à geração das paredes internas secundárias. Seguindo o mesmo princípio usado para a definição das paredes internas principais, selecionaram-se agora as arestas do hexágono e do triângulo com o objetivo de encontrar os pontos médios pertencentes a cada geometria. Depois de obtidos os pontos em duas listas diferentes - lista do hexágono e lista do triângulo - começou-se por organizá-las e transformá-las numa única lista (0,1,2,3,4,...,11). A partir desta, desenhou-se uma linha iniciada e terminada no ponto 0, formando uma geometria fechada, Figura 5.12 (m). Sendo um único elemento, a geometria fechada obtida foi extrudida desde o plano de base até à superfície e posteriormente cortada com a interseção da superfície interior anteriormente definida, Figura 5.12 (n). Desta forma, gerada a superfície exterior e as paredes internas, o bloco referente as pirâmides truncadas inferiores encontra-se finalizado, Figura 5.12 (o). A maior dificuldade encontrada no seu desenvolvimento, foi a organização das duas listas referidas anteriormente (triângulo e hexágono) por se tratarem de duas geometrias independentes e a sua organização ser diferente.

## 3. Rotação das pirâmides truncadas inferiores

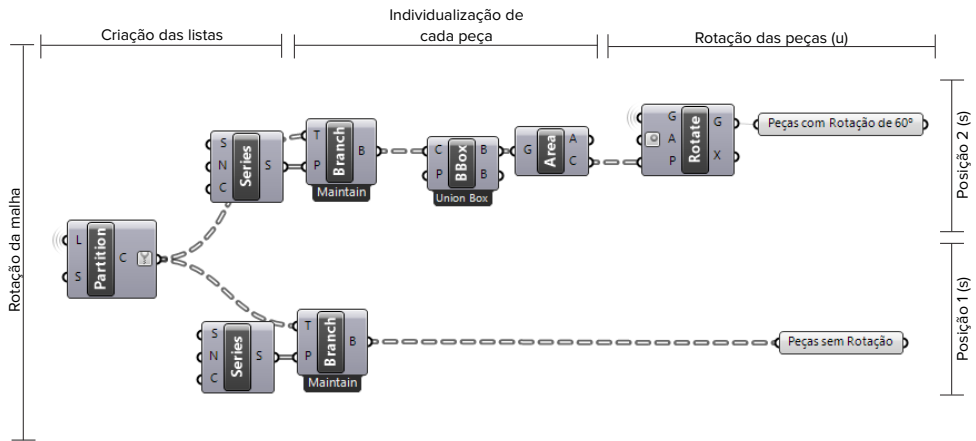
Por fim, a terceira fase de trabalho, corresponde à rotação das pirâmides truncadas inferiores. O principal objetivo desta fase de estudo era a criação de uma maior diversidade da forma através da movimentação da geometria das peças.

Antes de gerada a rotação dos blocos, foram estudadas as possíveis rotações a aplicar, obtendo-se duas posições, 1 e 2, Figura 5.16 (s). A partir da malha gerada com as pirâmides truncadas inferiores, dividiu-se esta em duas listas, uma lista pertencente à posição 1 e uma outra pertencente à posição 2. Para gerar esta variação individualizou-se cada bloco, originando setenta peças independentes. Após isso dividiu metade das peças mantendo a sua posição, e uma outra metade sofrendo uma rotação de 60°, como ilustrado na Figura 5.16 (u).



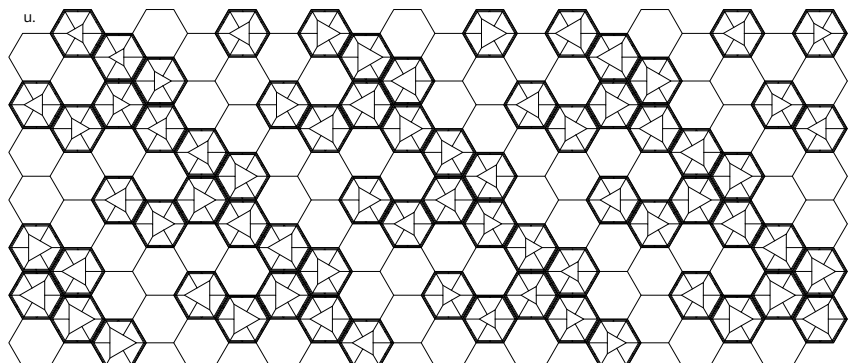
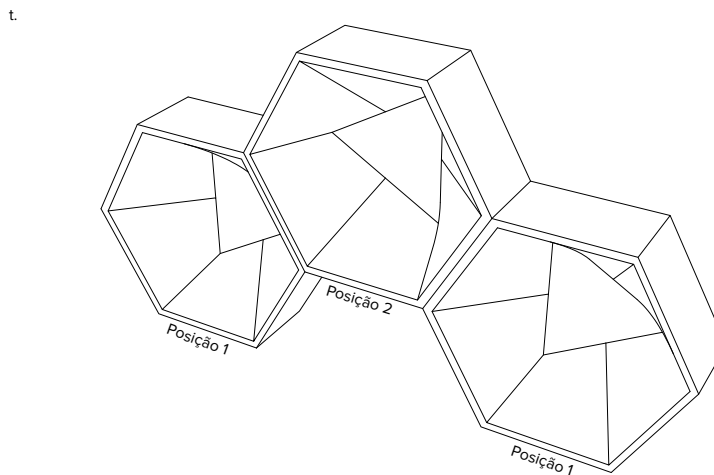
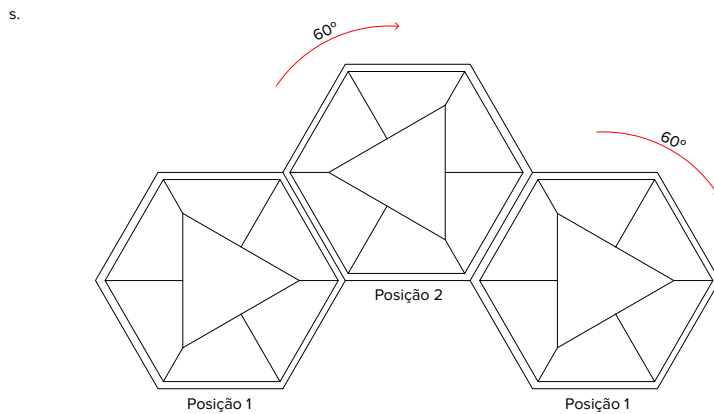
**Figura 5.13.** Código grasshopper, Desenvolvimento das paredes internas das pirâmides truncadas inferiores. Código gerado para as misturas à base de celulose.

**Figura 5.14.** Geração das paredes internas. p.Geração das paredes internas principais através da projeção das arestas da superfície no plano de base. q. Geração das paredes internas secundárias através da união entre os pontos médios. r.Finalização das pirâmides truncadas inferiores.



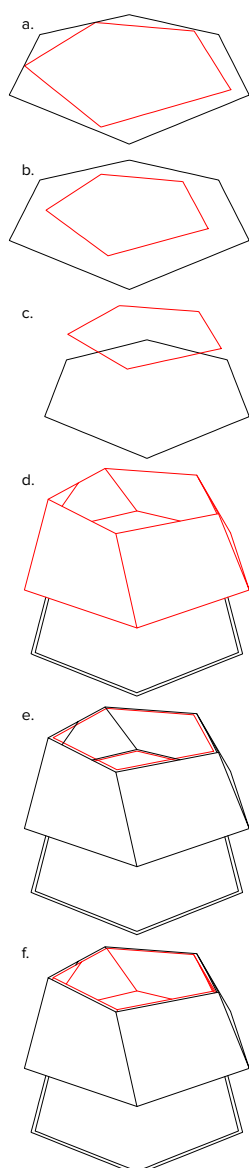
**Figura 5.15.** Código grasshopper, Rotação das pirâmides truncadas inferiores segundo um padrão. Código gerado para as misturas à base de celulose.

**Figura 5.16.** Rotação das pirâmides truncadas inferiores. s.Estudos das possíveis rotações, determinação da posição 1 e 2 segundo uma rotação de 60°. t.Axonometria exemplificativa da rotação presente nas peças segundo um ângulo de 60°. u.Composição do protótipo de estudo, observação das rotações mencionadas, posição 1 e 2, segundo uma condicional - padrão True e False.





## 5.2.3. Geração das pirâmides truncadas superiores



**Figura 5.17.** Geração das superfícies.  
a. Definição da malha hexagonal e pentagonal. b. Variação da dimensão da malha. c. Movimentação da malha pentagonal. d. Geração da superfície interior. e. Distância entre superfícies. f. Geração da superfície exterior.

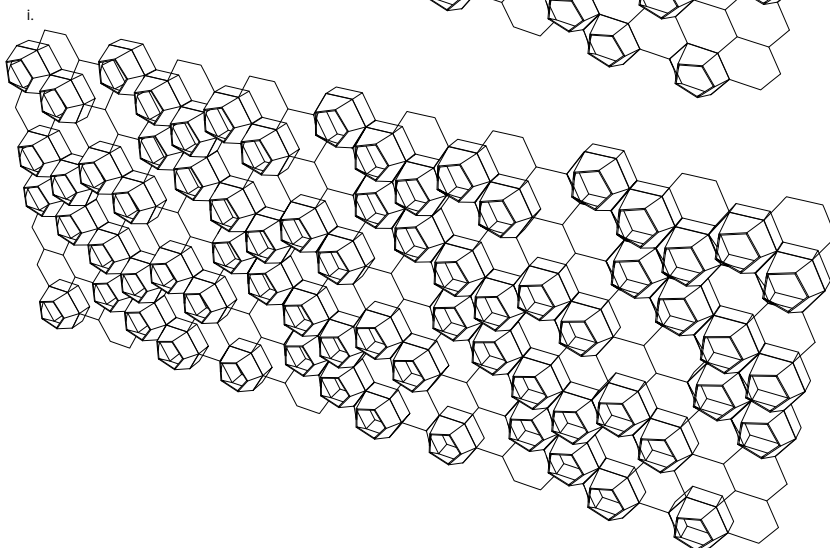
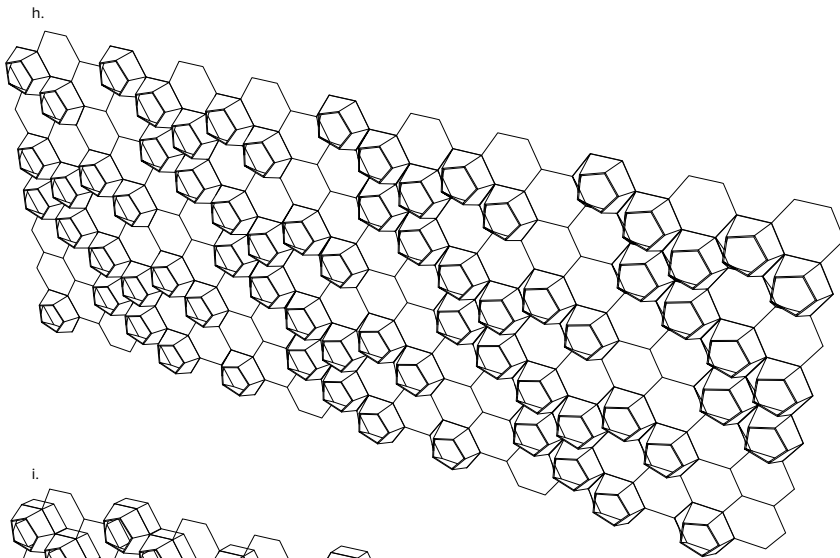
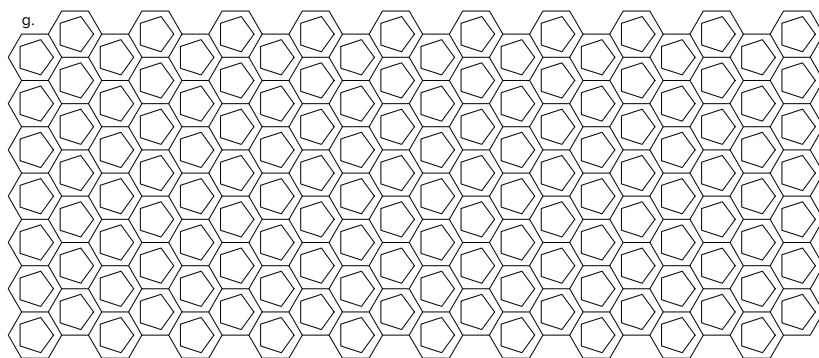
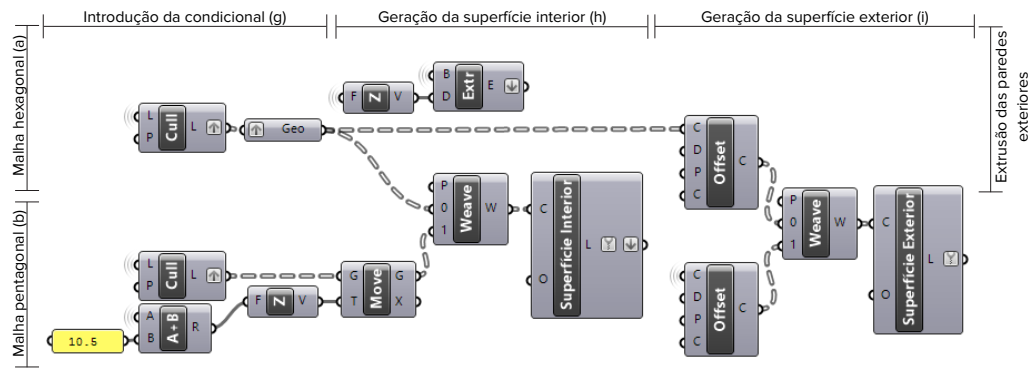
A terceira fase do trabalho, seguindo a mesma lógica da fase anterior, é composta pela geração das superfícies exteriores, definida por um hexágono e um pentágono - pirâmides truncadas superiores - a geração das paredes internas, através da extrusão das arestas pertencentes à superfície gerada e, por fim, a rotação das pirâmides truncadas superiores.

O principal objetivo desta fase de trabalho é gerar as pirâmides truncadas superiores, através da criação de uma superfície com dois polígonos distintos, pela passagem de uma geometria de seis lados - hexágono - para uma de cinco lados - pentágono.

### 1. Geração das Superfícies exteriores

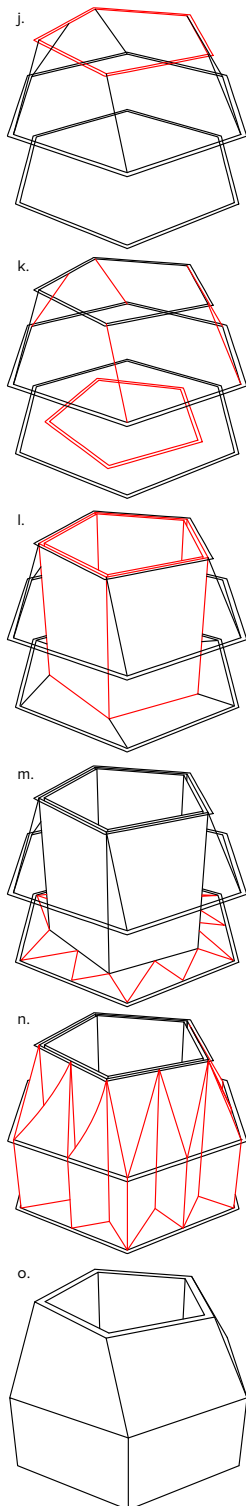
Para a geração das superfícies exteriores dividiu-se o código GH em três etapas distintas. Tendo em conta o estudo realizado anteriormente, no subcapítulo 5.2.1. Geração da malha hexagonal e suas variações, esta primeira etapa foca-se essencialmente na descoberta de uma nova malha pentagonal. Através da introdução de uma condicional, foi possível eliminar através de um padrão um conjunto de elementos que definem a malha. Se o padrão gerado anteriormente para a definição das pirâmides truncadas inferiores era True e False, para a definição destas passa a ser o inverso - False e True. Conforme o já referido, esta condicional permitiu gerar setenta peças inferiores e setenta peças superiores, segundo uma razão paramétrica. De igual modo à fase anterior deste estudo, a segunda etapa centra-se na geração da superfície exterior, Figura 5.17 (d) e posteriormente na superfície interior, Figura 5.17 (e), resultando esta da transformação de uma base hexagonal para um topo pentagonal. Uma vez que a superfície exterior possui as dimensões das paredes hexagonais do bloco, a segunda superfície foi gerada para o interior da peça, Figura 5.17 (f), um processo inverso ao da geração das peças inferiores. A geração de uma segunda superfície é definida na terceira etapa de estudo. A maior dificuldade encontrada nesta fase foi o controlo da superfície gerada pela mutação da base hexagonal, com seis arestas, numa base pentagonal, com cinco arestas, dificuldade essa que não foi sentida na definição da superfície da fase anterior, pelo triângulo possuir metade das arestas do hexágono.





**Figura 5.18.** Código grasshopper, Desenvolvimento das pirâmides truncadas superiores. Código gerado para as misturas à base de celulose.

**Figura 5.19.** Geração das pirâmides truncadas superiores. g.Introdução de uma condicional para eliminação de metade dos elementos que definem a malha pentagonal. h. Geração das duas superfícies das pirâmides truncadas superiores. i. Geração do bloco das pirâmides truncadas superiores sem inclusão de estrutura interna.



**Figura 5.20.** Geração das paredes internas. j.Seleção das arestas da base superior. k.Projeção das arestas da base superior e seleção das arestas da superfície gerada anteriormente. l.Extrusão da projeção da base superior. m.Desenvolvimento das paredes internas. n.Extrusão das paredes internas e posterior corte com a superfície. o.Geração do Bloco.

## 2. Geração das paredes internas

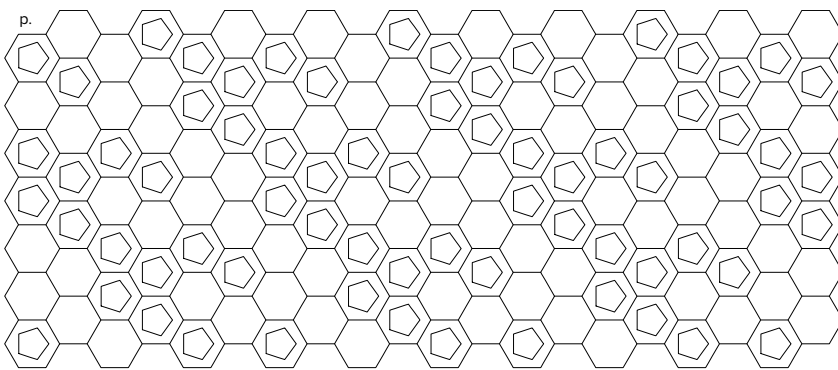
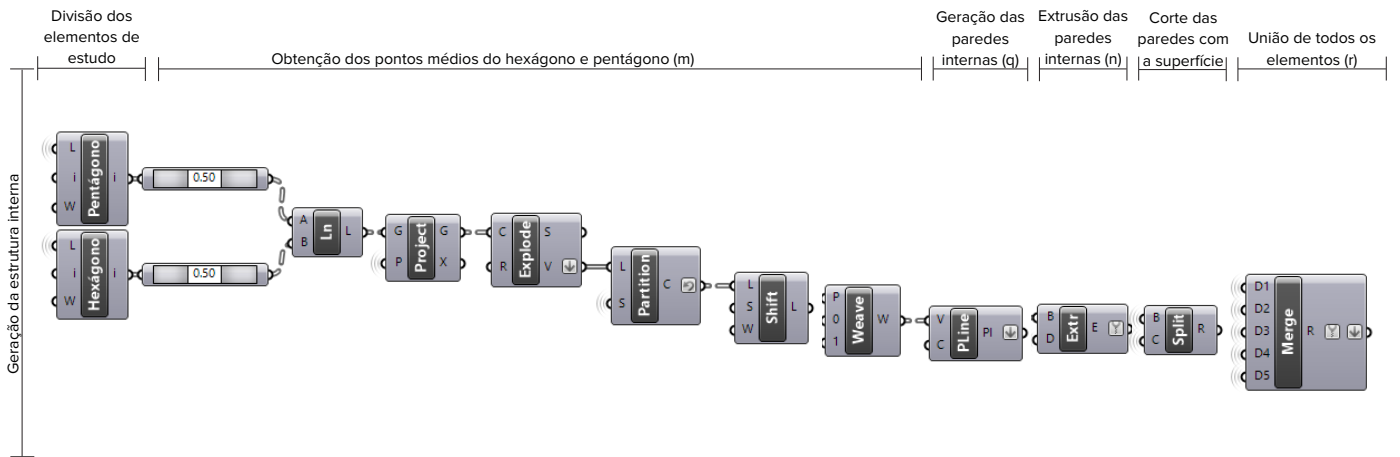
Gerada a superfície com base superior pentagonal e base inferior hexagonal, passou-se ao desenvolvimento das paredes internas. Esta fase é dividida em duas etapas, a geração das paredes internas principais e a geração das paredes internas secundárias.

Para o desenvolvimento das paredes internas recorreu-se à divisão dos elementos pertencentes à superfície gerada anteriormente em dois módulos, as arestas do pentágono e as arestas do hexágono. Relativamente à geração das paredes internas principais, projetou-se no plano de base hexagonal ambas as bases superiores do pentágono, Figura 5.20 (j), estas foram extrudidas posteriormente até alcançarem novamente a face superior pentagonal, Figura 5.20 (l). A segunda etapa, geração das paredes secundárias, resultou da seleção das arestas do hexágono e pentágono, com o objetivo de se obter os seus pontos médios. De uma forma semelhante à fase anterior, os pontos médios das duas geometrias independentes foram organizados formando uma lista contínua de pontos (0,1,2,3,4...22). Organizada a lista, desenhou-se uma linha iniciada em 0 e percorrendo todos os seus pontos até alcançar novamente o ponto 0, Figura 5.20 (m). Esta linha foi extrudida desde o plano de base do bloco até à sua superfície, cortando a parede com a união da superfície interior gerada anteriormente, Figura 5.20 (n). Gerada a superfície e as paredes internas, o bloco superior encontra-se finalizado, Figura 5.20 (o).

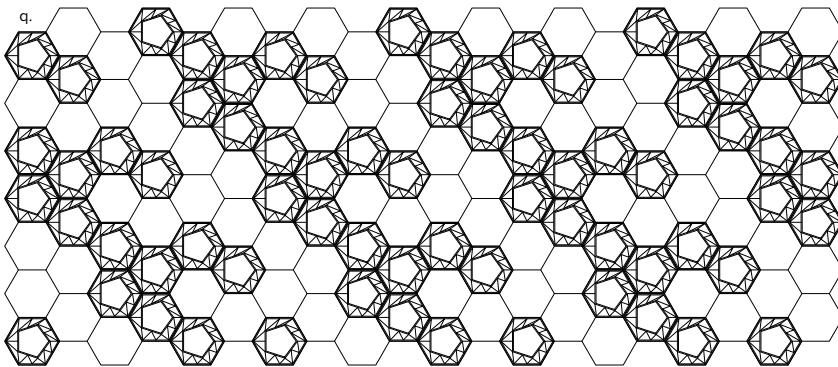
A maior dificuldade encontrada no desenvolvimento deste bloco, foi a organização das duas listas referidas anteriormente - pentágono e hexágono - por se tratarem de duas geometrias independentes e a sua organização ser diferente. Também foi extremamente difícil o corte das paredes interiores secundárias através da superfície interior gerada por se tratar de cortes curvos complexos. A geração das paredes internas condicionou todo o desenho do protótipo, tendo sido necessário eliminar uma parte das variações introduzidas anteriormente. Desta forma, todas as peças superiores possuem a mesma dimensão de abertura, tendo sido anulada a sua variação em relação aos pontos introduzidos inicialmente.

## 3. Rotação das pirâmides truncadas superiores

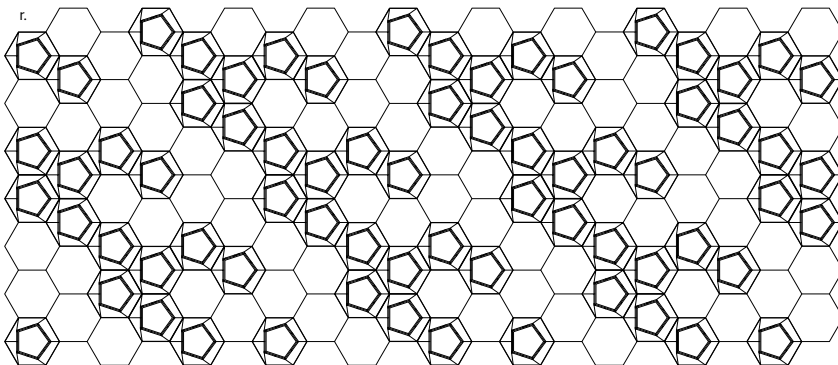
A terceira fase de trabalho corresponde à rotação das pirâmides truncadas superiores. De forma semelhante à rotação das pirâmides truncadas inferiores, o principal objetivo desta fase de estudo era a criação de uma diversidade da forma através da introdução de uma variação na posição das peças. Antes de gerada a rotação da parede, foram estudadas as possíveis rotações a aplicar, obtendo-se seis possíveis posições distintas, de 1 a 6, Figura 5.24 (s), e das quais foram aplicadas quatro. A partir da malha gerada com as pirâmides truncadas superiores dividiu-se esta em quatro listas, cada uma sofrendo rotações de  $60^\circ$ , como ilustrado na Figura 5.24 (t) e (u). Para gerar esta variação individualizou-se cada bloco referente às pirâmides truncadas superiores originando setenta peças independentes.

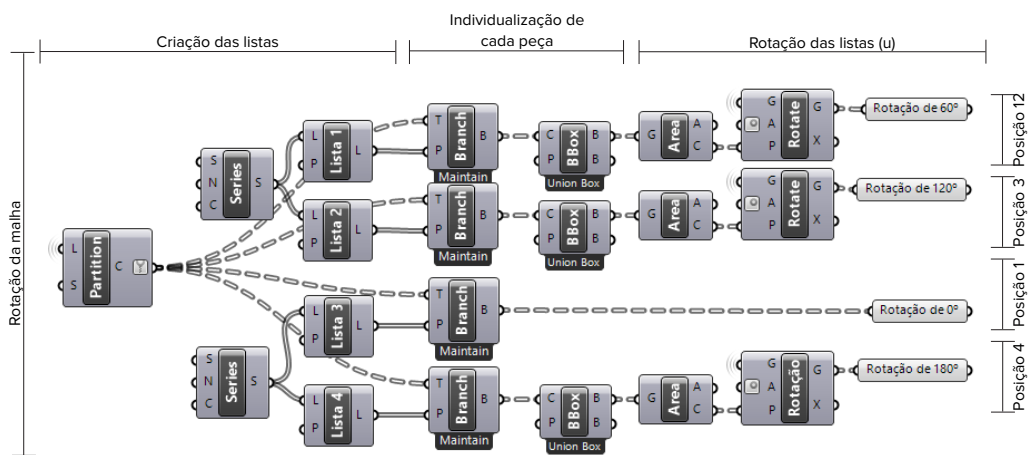


**Figura 5.21.** Código grasshopper, Desenvolvimento das paredes internas das pirâmides truncadas superiores. Código gerado para as misturas à base de celulose.



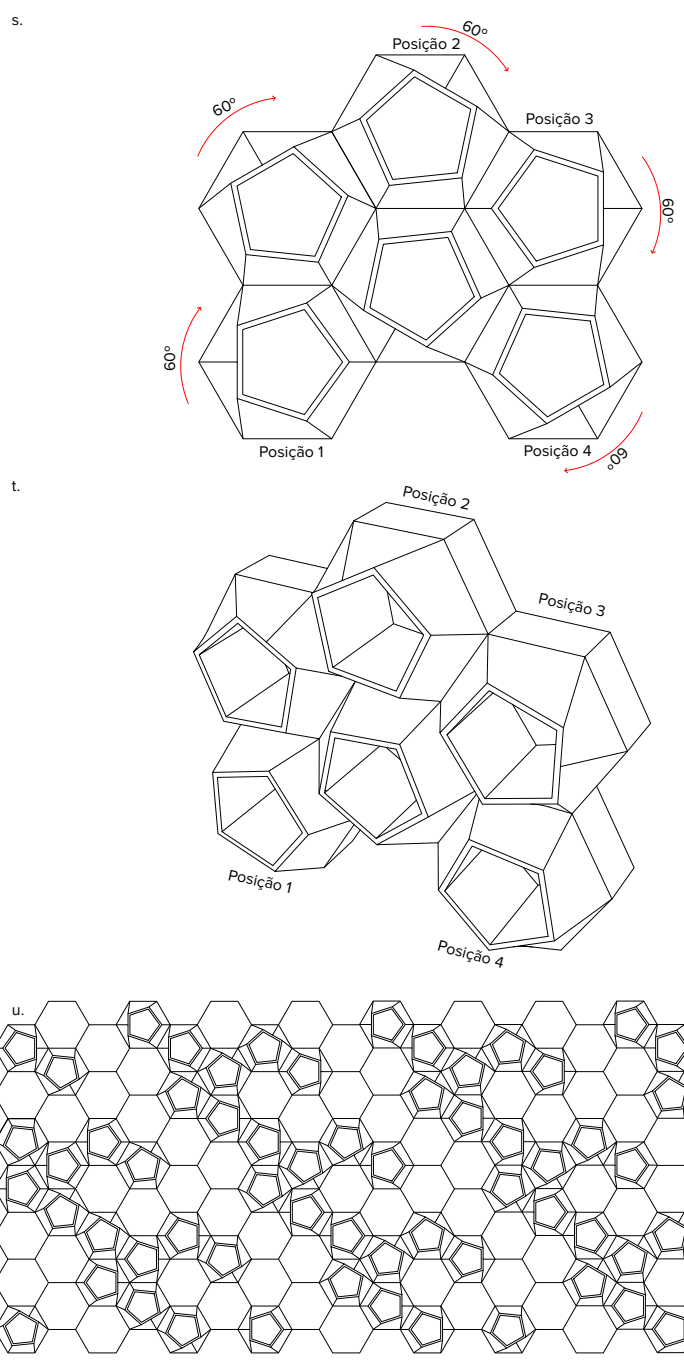
**Figura 5.22.** Geração das paredes internas. p.Geração das paredes internas principais. q. Geração das paredes internas secundárias através da união entre os pontos médios. r.Finalização das pirâmides truncadas superiores.

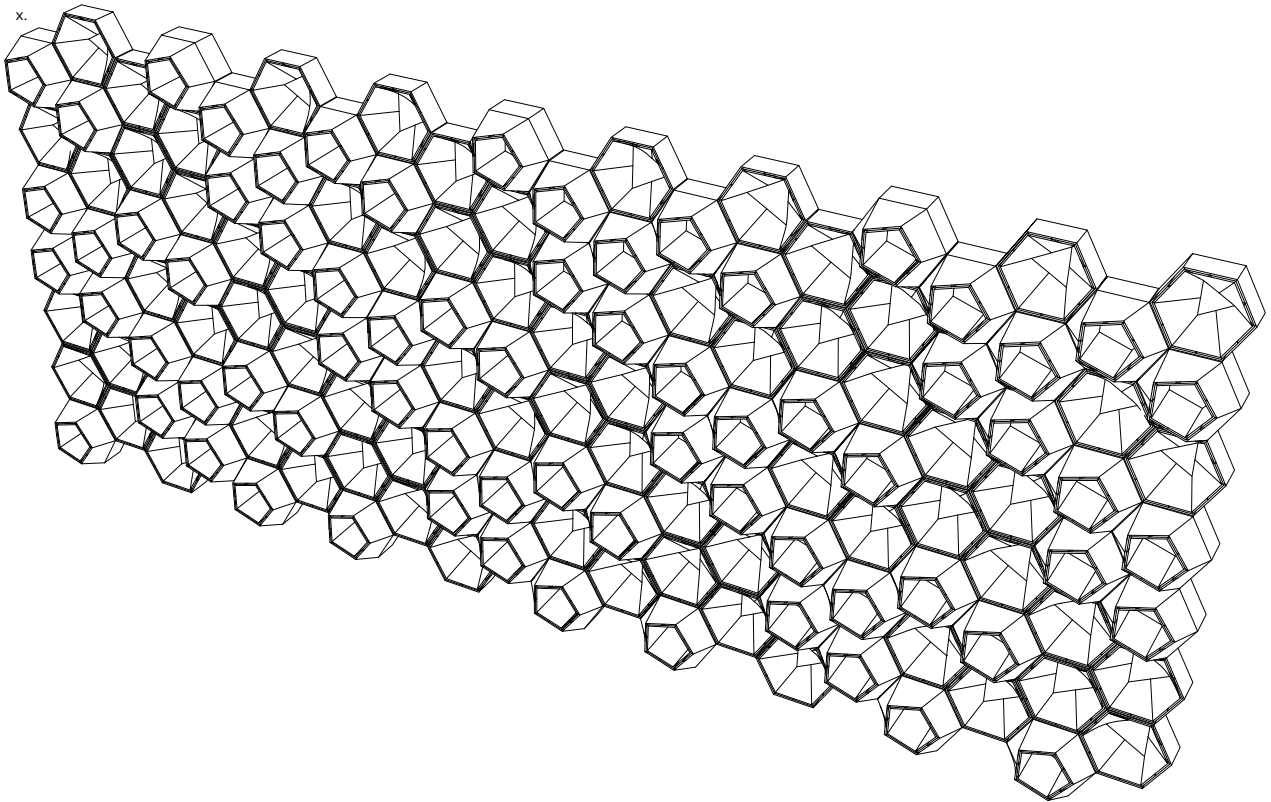
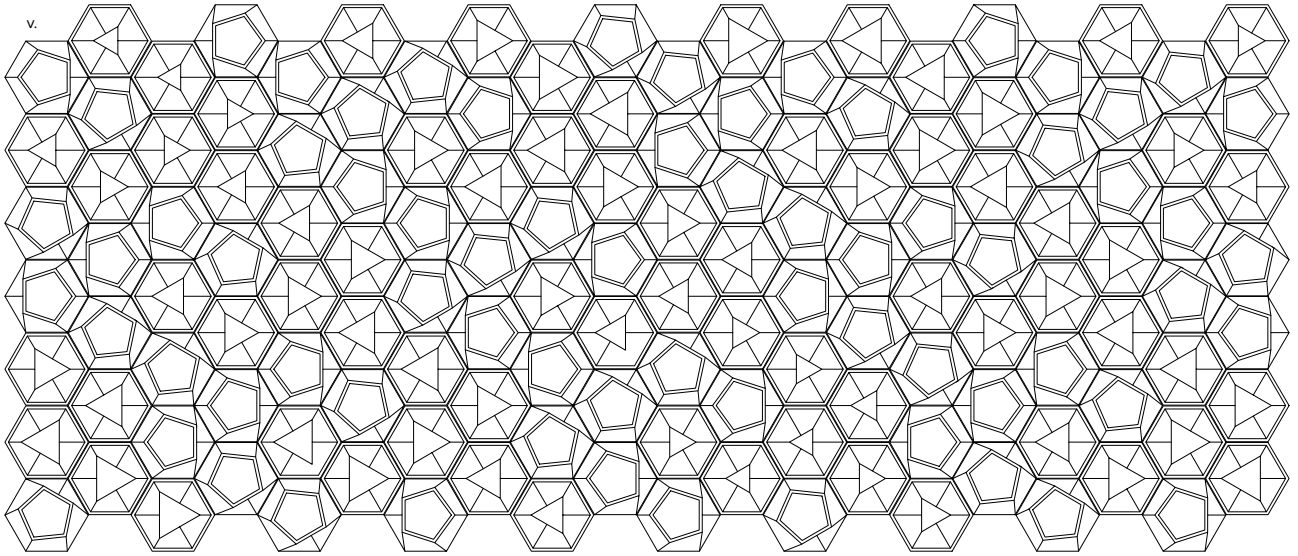




**Figura 5.23.** Código grasshopper, Rotação das pirâmides truncadas superiores segundo um padrão. Código gerado para as misturas à base de celulose.

**Figura 5.24.** Rotação das pirâmides truncadas superiores. s. Estudos das possíveis rotações, determinação da posição 1 a 4 segundo uma rotação de 60°. t. Axonometria exemplificativa da rotação presente nas peças segundo um ângulo de 60°. u. Composição do protótipo de estudo, observação das rotações mencionadas, posição 1 a 4, segundo uma condicional - padrão True e False.





**Figura 5.25.** Finalização do modelo computacional, protótipo de parede - caso de estudo. v.Plano de frente do modelo. x.Axonometria ilustrativa do modelo.



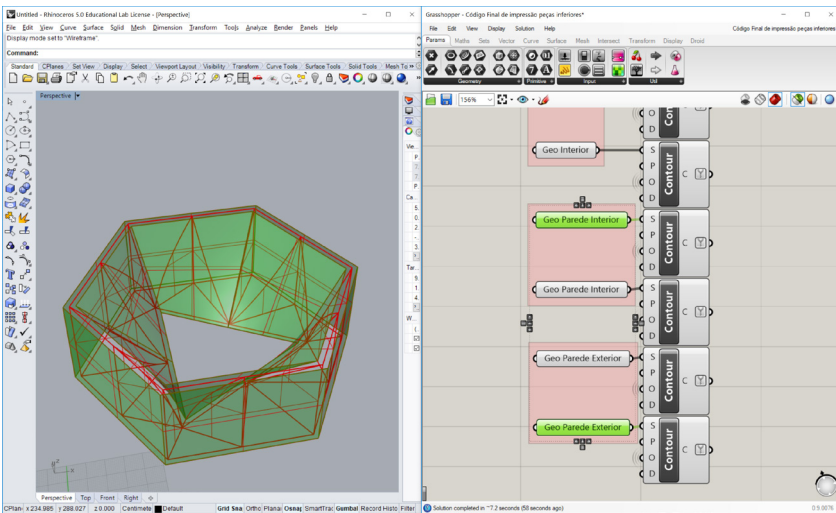
## 5.3. G-Code

Para a iniciação do fabrico aditivo de uma parede protótipo, após a sua definição conforme o processo descrito no subcapítulo anterior, geração através de programas computacionais, recorreu-se mais uma vez à utilização do Grasshopper como ferramenta auxiliar à automatização da geração dos códigos de controlo numérico (G-Code) para o fabrico de cada um dos blocos que compõem a parede. O modelo Grasshopper utilizado, Figura 5.28, foi desenvolvido com o objetivo de gerar um corpo de texto, contendo todas as ordens que a impressora precisa concretizar para a execução dos blocos. Desenvolvido no âmbito de investigações do Laboratório de Cerâmica Avançada, no Instituto de Design da Universidade do Minho, o modelo foi adaptado à especificidade das peças da parede, com o propósito de simplificar a sua leitura e utilização.

Pela presença de dois grupos distintos de peças, optou-se pela criação de dois modelos, um referente às pirâmides truncadas inferiores e outro às pirâmides truncadas superiores. Este passo foi importante devido à quantidade de geometrias presentes nos dois grupos, uma vez que as geometrias presente nas peças inferiores são superiores às presentes nas peças superiores. Para gerar o G-Code é necessário introduzir as diversas geometrias com a ordem correta de impressão, Figura 5.26. Essas geometrias unem-se criando um contour sobre todas as superfícies anexadas, após isso gera-se um código total de impressão, para a produção das peças.

Em ambos os grupos foram criadas paredes duplas exteriores, superfícies duplas exteriores e paredes simples interiores. Para um bom G-Code e qualidade de impressão, optou-se por introduzir primeiro as paredes duplas interiores, as paredes simples internas e posteriormente desenhar as paredes exteriores finais. Caso este passo não esteja bem planificado, quando realizado o fabrico da peça, a produção destas vai apresentar falhas pois o código gerado apresenta defeitos e esses são lidos integralmente pela impressora, Figura 5.27. Após a geração do código, este pode ser automaticamente guardado pelo recurso de um plug-in no GH, o Droid<sup>1</sup>, Figura 5.28 ou então transportado o código gerado no GH para o software Repetier e produzido o ficheiro G-Code pronto a ser copiado para o cartão da impressora e iniciado o fabrico da peça, Figura 5.28.

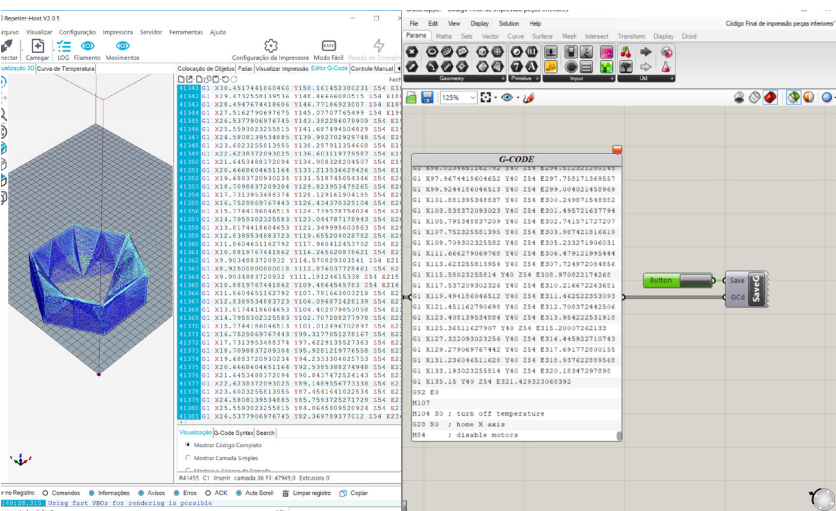
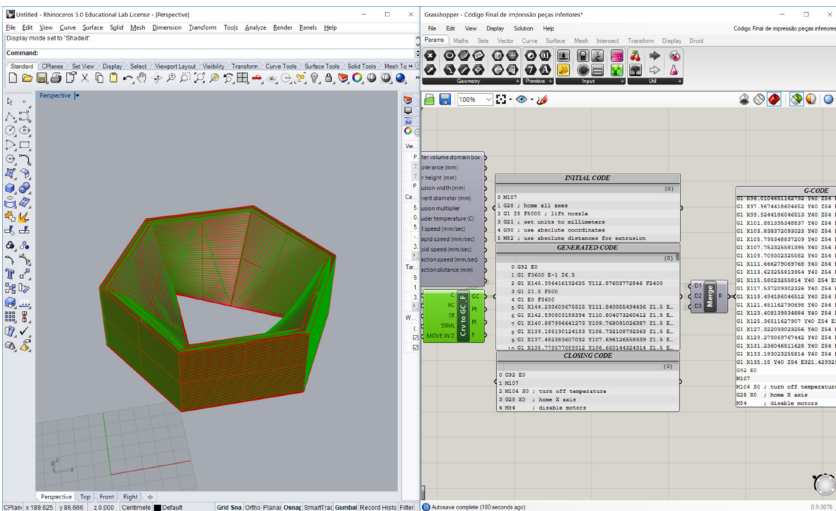
1. O Droid é um plug-in que pertence à biblioteca do Grasshopper, permite gerar o G-code para a fabricação dos modelos, caminhos personalizados e o seu Slicing. Este plug-in foi obtido no site [www.food4rhino.com](http://www.food4rhino.com)



**Figura 5.26.** Interface gráfico do ambiente de trabalho do Rhinoceros (esquerda) com Grasshopper (direita), com a introdução das geometrias no código de impressão em Grasshopper.

**Figura 5.27.** Interface gráfico do ambiente de trabalho do Rhinoceros (esquerda) com Grasshopper (direita), com a introdução das geometrias que definem a peça, no código de impressão para geração do G-Code.

**Figura 5.28.** Interface gráfico do ambiente de trabalho do Repetier (esquerda) com Grasshopper (direita) utilizando um plug-in, com a geração do G-Code.





## 5.4. Fabrico aditivo do modelo

O presente subcapítulo visa demonstrar o processo de fabrico do estudo de caso, assim como todos os estudos realizados para a conjugação dos diversos elementos. O fabrico aditivo das peças divide-se em três grandes fases de trabalho, a impressão, a secagem e o acabamento. Visto que até esta fase de produção, todos os estudos realizados originavam peças soltas e independentes, nesta etapa isso não acontece, sendo que é necessário ter em conta todas as potencialidades e desvantagens de cada mistura utilizada, acoplando-as entre si e formando um objeto único e conciso.

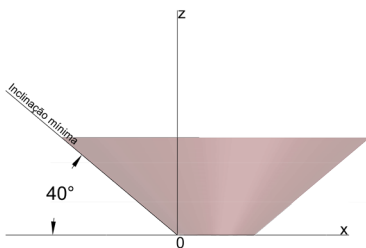
A secagem é talvez a fase com maior relevância para este estudo, pois agrega todos os comportamentos após impressão. É nesta fase que se concentra o estudo de retração, de mistura para mistura e de material para material; e o estudo e controlo da deformação, essencial para encaixes e ligações perfeitas entre os diversos blocos. O modelo desenvolvido inicialmente, sofreu distintas transformações, quer ao nível da forma como a sua dimensão e este só pôde ser concretizado após a secagem de todos os elementos.

O estudo de retração divide-se em três grupos, de acordo com os diferentes materiais testados, a retração das peças de argila, a retração das peças em celulose e a retração das peças em celulose e fibras de madeira. O estudo de deformação divide-se em dois grupos, a deformação das peças inferiores e a deformação das peças superiores, cada grupo apresenta diversas fases de execução e planificação da peça.

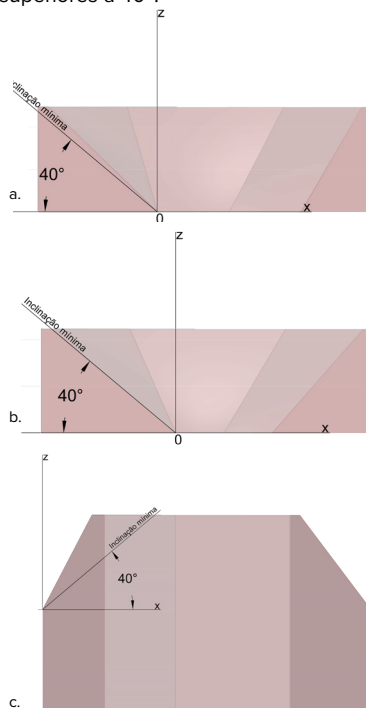
Uma vez que só uma pequena parcela do protótipo de parede será produzido, foi importante analisar o comportamento observado ao longo da produção destas, assim como, após a produção e montagem. Para que fosse possível obter a uma parede autoportante, foram desenvolvidos encaixes que consideraram a forma das peças e o seu comportamento após a secagem.



## 5.4.1. Impressão



**Figura 5.29.** Gráfico demonstrativo da inclinação mínima possível para a fabricação de peça ou bloco com misturas à base de pastas de celulose em pó e argila com pasta de celulose em pó. Todas as peças produzidas devem apresentar inclinações iguais ou superiores a  $40^\circ$ .



**Figura 5.30.** Inclinação mínima verificada nas peças inferiores e superiores. (a) Peça inferior com inclinação mínima de  $40^\circ$ , (b) Peça inferior com inclinação mínima de  $46^\circ$  e Peça superior com inclinação mínima de  $53^\circ$ .

Uma vez gerado o modelo computacional paramétrico do estudo de caso, foi extremamente importante selecionar uma amostra para fabrico, Figura 5.34. A seleção deste tramo de parede considera alguns parâmetros propostos, derivados do desenho da forma, para a realização do estudo da amostra aquando da sua fabricação.

O primeiro parâmetro, tinha como objetivo estudar as inclinações das paredes das peças inferiores, Figura 5.32, tendo em conta a divergência do tamanho das suas aberturas. Visto que o grau de inclinação máximo permitido para a fabricação de uma parede curva seria de  $40^\circ$ , fator verificado aquando o estudo individual de cada mistura, então todas as paredes deveriam tomar uma inclinação entre os  $40^\circ$  e os  $90^\circ$ , Figura 5.29. Com o desenvolvimento do desenho paramétrico e as diferenciações das aberturas das peças, estas paredes rondam os  $40^\circ$ , nas peças de menor abertura e  $46^\circ$ , nas peças de maior abertura, Figura 5.30. Apesar de essas dimensões se encontrarem dentro do limite estipulado, muitas das vezes no ato de fabricação a mistura não consegue responder aos parâmetros traçados, assim com a inclusão de uma amostra divergente, este primeiro parâmetro de estudo é totalmente verificado.

O segundo parâmetro, tinha como objetivo estudar a inclinação das paredes das peças superiores, visando o princípio acima referenciado. Estas apresentam uma inclinação de  $53^\circ$ , Figura 5.30, sendo que todas elas são semelhantes entre si, pois devido à geração de uma parede iniciada num hexágono e finalizada num pentágono, se o fator de abertura fosse alterado, então algumas das suas faces apresentariam algumas deformações, o que no ato de fabricação causaria alguns problemas.

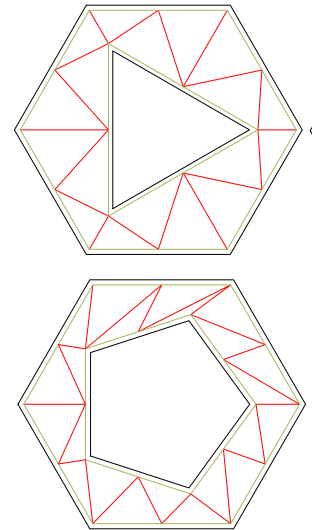
O terceiro e último parâmetro, tinha como objetivo escolher uma amostra, onde a rotação verificada nas peças fosse mais acentuada, nas peças superiores, visando quatro e peças inferiores, visando duas posições distintas. Optou-se pela escolha de um protótipo como ilustrado na Figura 5.33, para a criação de um modelo mais estável, compreendido por 28 peças totais, das quais 14 são inferiores e 14 superiores.

Após a seleção da amostra, procedeu-se à sua fabricação, para tal a escolha mais viável para impressão foi a Lutum®Mini 2.0, devido à estabilidade que apresenta durante a produção das peças. Como

referido anteriormente, todas as peças apresentam paredes duplas, exceto as interiores, como ilustrado na Figura 5.31. Para uma melhor fabricação definiu-se um caminho, em que, de acordo com a Figura 5.31, as paredes a verde são as primeiras a serem impressas, seguidamente das vermelhas e posteriormente, as paredes a cor preta. Este caminho tem como objetivo imprimir duas formas limite, duas paredes exteriores, para que aquando o desenho das paredes interiores, a interseção entre os pontos de contacto das paredes seja mais resistente.

Para a geração de peças com qualidade e melhor desempenho estrutural, introduziu-se no G-Code a subida em Z sempre que esta desenhe uma forma fechada, para se evitar o arrastamento de material. Este parâmetro foi extremamente importante no ato de impressão com as misturas à base de celulose, mistura B e B.1, devido ao fator já enunciado anteriormente no estudo individual de cada uma. Derivado da fluidez do material, a impressão não conseguia delimitar a extrusão da pasta, sendo que esta era continuamente expulsa e ao desenhar múltiplas formas fechadas, muitas das vezes a camada desenhada era arrastada para o ponto inicial de outra forma fechada. Com a subida em Z, a pasta consegue romper a ligação no ponto final, aumentando a qualidade de impressão e eliminando possíveis arrastamento de material e camadas desenhadas. Visto que nem todas as formas são fechadas, muitas delas são paredes simples que iniciam num ponto de acabam noutro, este parâmetro é fundamental para a produção destas.

Concluindo, as peças produzidas à base de celulose, necessitam de um menor cuidado no ato de impressão e uma menor pressão de ar no cartucho que as peças à base de argila. Estas por apresentarem dimensões inferiores às peças de argila, o seu tempo de produção é inferior. A diferenciação do tamanho das peças deve-se sobretudo ao fator de retração verificado nas peças de argila. Este parâmetro será estudado com mais detalhe no subcapítulo seguinte *5.4.2 Secagem*.

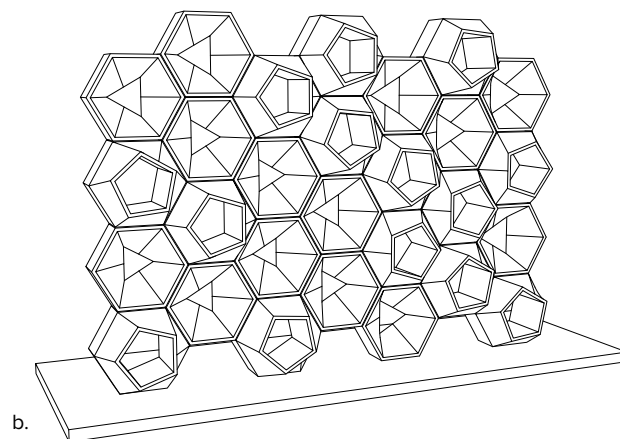
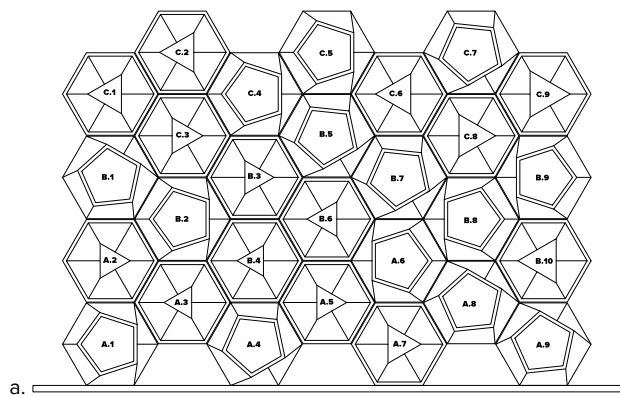
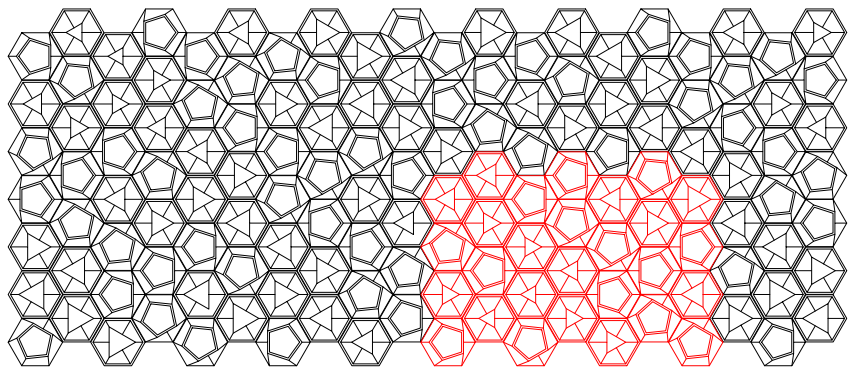
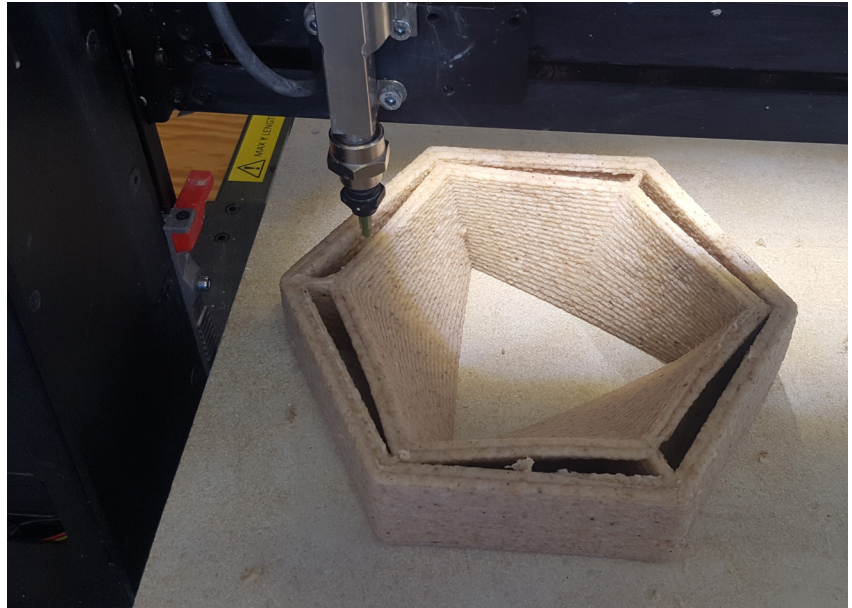


**Figura 5.31.** Observação das paredes duplas a preto e verde e paredes simples a vermelho. Caminho percorrido durante a impressão das peças, primeiro linhas a verde, segundo linhas a vermelho e terceiro linhas a preto.

**Figura 5.32.** Impressão com a mistura B.1, do caso de estudo.

**Figura 5.33.** Escolha do tramo de parede a ser prototipado do caso de estudo.

**Figura 5.34.** (a) Amostra ampliada escolhida para fabricação. As peças de A.1 a A.9, serão produzidas com a mistura D, as peças de B.1 a B.10 serão produzidas com a mistura B.1 e as peças de C.1 a C.9 serão produzidas com a mistura B. (b) Axonometria representativa da amostra ampliada escolhida para fabricação.







## 5.4.2. Secagem

A secagem é a fase que sucede a impressão e é definida pela desidratação das peças fabricadas com os materiais em estudo, estas perdem água alterando as suas configurações iniciais. O comportamento observado durante o ato de secagem, de acordo com as informações obtidas no capítulo anterior, *4. Fabrico aditivo com celulose*, é divergente de mistura para mistura. Para melhor entender as divergências entre elas, foram criados dois núcleos de trabalho, o primeiro referente à celulose e o segundo à argila.

O primeiro núcleo, peças produzidas com misturas à base de celulose (B e B.1), as que tiveram menores complicações no decorrer da secagem, isto porque, para se obter uma boa cura do material, foi necessário proceder a uma secagem artificial prévia, num ambiente controlado com temperaturas superiores a 30°C e inferiores a 75°C. Este fator é extremamente relevante, pois caso contrário inicia-se um processo de decomposição. Como já enunciado no estudo individual de cada mistura, devido à presença do amido, um polissacarídeo presente nas paredes celulares das plantas. A secagem destas deve ser realizada num intervalo de 36 a 48 horas garantindo a eliminação total da água e aumentando a sua resistência. Quanto mais lento é o processo de secagem, maior é a facilidade de controlo sobre o acabamento da peça, quando esta permanece num ambiente controlado a baixas temperaturas, a laminação e destacamento entre as diversas camadas é controlado e de certa forma reduzido. Quanto menor for a temperatura de secagem, maior é o intervalo de tempo entre a cura final da peça, melhorando o seu acabamento final, como observado na Figura 5.35.

O segundo núcleo, constituído por peças produzidas com misturas à base de argila C e D, foram aquelas que maiores complicações demonstraram no ato de secagem, devido ao excessivo índice de retração a que a mistura está sujeita, como observado na Figura 5.36. Apesar de possuir um conjunto de propriedades, dureza, densidade, durabilidade e uma versatilidade de aplicação na arquitetura, a trabalhabilidade deste material no ato de cura é a sua maior desvantagem. *“During drying and subsequent firing, shrinkage occurs as moisture is removed.”* (Bechtold, 2015) Quando o processo, é necessário ter em conta as variações térmicas que a peça está sujeita, pois se estas forem demasiado

excessivas, dá-se outras consequências, como a fissuração nas zonas de maior fragilidade. A presença das fibras de celulose, permite um maior controlo sobre estes parâmetros, nomeadamente a fissuração e deformação, mas não consegue diminuir a retração do material no ato de cura. Para se evitar tais consequências é aconselhável a colocação destas num ambiente controlado, nomeadamente na estufa, a temperaturas baixas e constantes, abrandando a desidratação excessiva do material.

*“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” (Carvalho, 2018).*

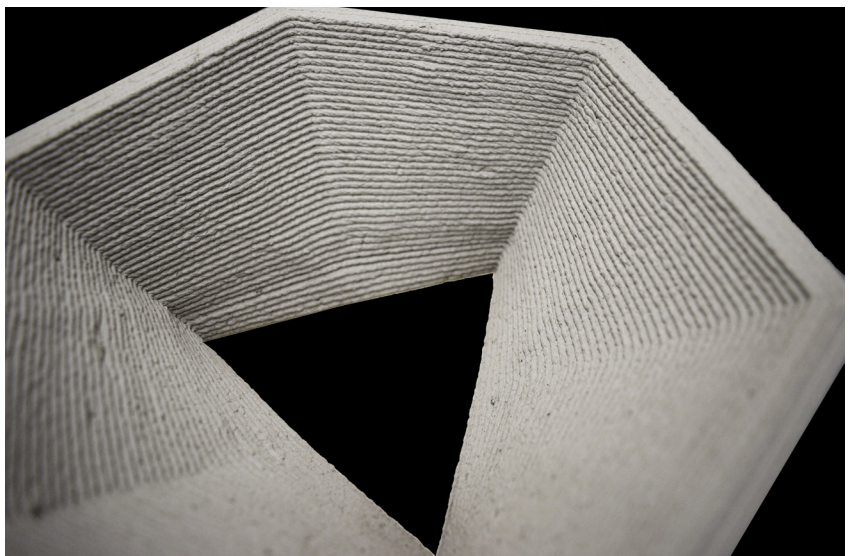
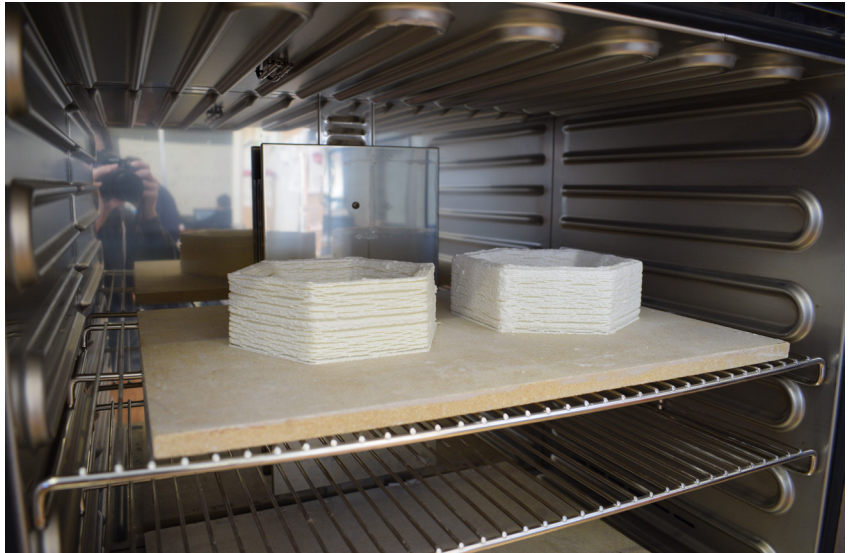
A cozedura é um processo essencial após a cura das peças, pois confere rigidez e permite o fácil controlo de muitas das propriedades da argila, nomeadamente a resistência mecânica da peça, a estabilidade dimensional, resistência à água, fogo e substâncias químicas. Estas geralmente conseguem suportar bem forças de compressão, comportando-se mal à tensão. O processo de cozedura atinge temperaturas máximas de 1260°C e o comportamento das fibras de celulose é interessante, estas tendem a queimar mas permanecem na mistura como pequenos grãos de areia vitrificados em tons de branco. Quando finalizado este processo, o material apresenta níveis de resistência elevados e a sua resistência mecânica depende da geometria definida. As fibras de celulose conferem maior resistência e leveza ao material, também tendem a alterar a cor final, para uma tonalidade mais clara, como observado na Figura 5.37.

Este subcapítulo encontra-se dividido em dois estudos, o estudo da retração e a deformação após secagem. Ambos se dividem nos dois núcleos acima exponenciados, pois os seus comportamentos são muito divergentes entre si. No estudo da retração dá-se a conhecer a retração verificada ao longo dos dois núcleos de trabalho e a forma adotada para a manipulação deste parâmetro conferindo uma conjugação excelente entre as diferentes peças de definem o estudo de caso. No estudo da deformação, dá-se a conhecer o método definido para um controlo sobre as deformações verificadas ao longo da secagem da celulose e cura/cozedura da argila.

**Figura 5.35.** Retração da peça produzida com celulose.

**Figura 5.36.** Retração da peça produzida em argila. Peça à esquerda encontra-se seca, peça à direita encontra-se cozida.

**Figura 5.37.** Acabamento final da peça em argila, com observação das fibras de celulose.





## 5.4.2.1. Estudo da Retração

**Tabela 5.01.** Representação das dimensões inicialmente propostas para a fabricação das peças, as dimensões obtidas após a secagem e o índice de retração tendo em conta os dois fatores enunciados.

O estudo da retração das peças referentes a amostra selecionada para a produção da amostra do protótipo de parede, uma das fases de maior importância desta investigação. Quando proposto um estudo de caso, o primeiro parâmetro lançado seria a perfeita conjugação das peças produzidas com as diversas misturas. Como já observado no estudo individual de cada mistura, a retração destas não é idêntica, sendo o índice de retração das peças em argila superiores às produzidas com celulose, como observado na Figura 5.38. A retração do material dá-se sobretudo devido à desidratação do material após a sua produção.

*“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)” (Carvalho, 2018).*

As variações térmicas a que a peça está sujeita durante a sua cura podem resultar em fissurações nas zonas mais frágeis, sobretudo onde há mudanças de direção no caminho de extrusão, por este motivo é aconselhável a criação de condições para uma desidratação lenta através da colocação das peças em estufa, como nas peças em celulose. Para dar a conhecer esta divergência de comportamento entre misturas, realizou-se um primeiro teste, que consistia na impressão de uma peça em celulose com a mistura B.1, pasta de celulose em pó branqueada, amido e fibras de madeira, e uma outra em argila com a mistura D, pasta de cerâmica, argila do tipo GRES 130 MP e pasta de celulose em pó branqueada, com as mesmas dimensões, comprimento e altura, de acordo com a tabela abaixo apresentada. A altura está associada à base de apoio das diferentes peças enquanto que o comprimento está associado ao diâmetro proposto para o desenho do hexágono.

	<b>Mistura B.1</b>		<b>Mistura D</b>	
	Celulose em pó + Amido + Fibras de madeira		Celulose em pó + Argila	
	Altura	Comprimento	Altura	Comprimento
Impressão	5 cm	20 cm	5 cm	20 cm
Secagem	4,5 cm	20cm	3,7 cm	17 cm
Índice de retração	10%	0%	26%	15%

Após produção e secagem, foi possível concluir que as dimensões finais destas eram divergentes de acordo com a mistura utilizada, como observado na tabela abaixo apresentada. Com isto, pode-se concluir que o índice de retração das peças produzidas à base de misturas de celulose, B e B.1, consegue ter um comportamento superior aquele observado nas peças produzidas com misturas à base de argila.

Para contornar este fator observado, dividiu-se a produção das peças em dois momentos, a produção das peças de argila e a produção das peças de celulose. Esta partição permitiu que fosse possível alterar as dimensões inicialmente propostas potenciando assim, a conjugação entre os dois momentos.

Realizou-se um segundo teste, que consistia na manipulação das dimensões de ambos os momentos, usando como base de estudo a altura inicialmente proposta de 5cm e a base de retração da peça em argila após secagem, com 17cm de comprimento. Para respeitar este padrão de estudo, foram dadas compensações estratégicas com o objetivo de após a secagem, estas possuírem as dimensões pretendidas. O método mais comum de tratar a retração é escalar certas partes para corresponder com as dimensões finais desejadas. Muitas vezes, é possível retificar dimensionalmente as peças após cozedura, mas há custos envolvidos na etapa adicional. (Bechtold, 2015) Para isto acontecer, e como observado na tabela abaixo apresentada, as dimensões de impressão das peças de argila são superiores às dimensões estipuladas para as peças em celulose. Este fator deve-se sobretudo ao índice de retração elevado da argila, como observado na tabela anterior.

**Tabela 5.02.** Representação das dimensões estratégicas de compensação para produção de peças com dimensões iguais, tendo em conta os dois momentos de estudo.

	<b>Mistura B.1</b>		<b>Mistura D</b>	
	Celulose em pó + Amido + Fibras de madeira		Celulose em pó + Argila	
	Altura	Comprimento	Altura	Comprimento
Compensação	+0,5 cm	-3,0 cm	+1,5 cm	0 cm
Dimensão Final	5,5 cm	17cm	6,5 cm	20 cm

Apesar do elevado grau de retração decorrente nas peças de argila, as peças em celulose, ao perderem a água presente nos grãos saturados de celulose, tendem a retrair o seu volume, provocando uma excessiva laminação e destacamento entre as diferentes camadas que constituem o objeto, parâmetro já observado no estudo individual de cada mistura.

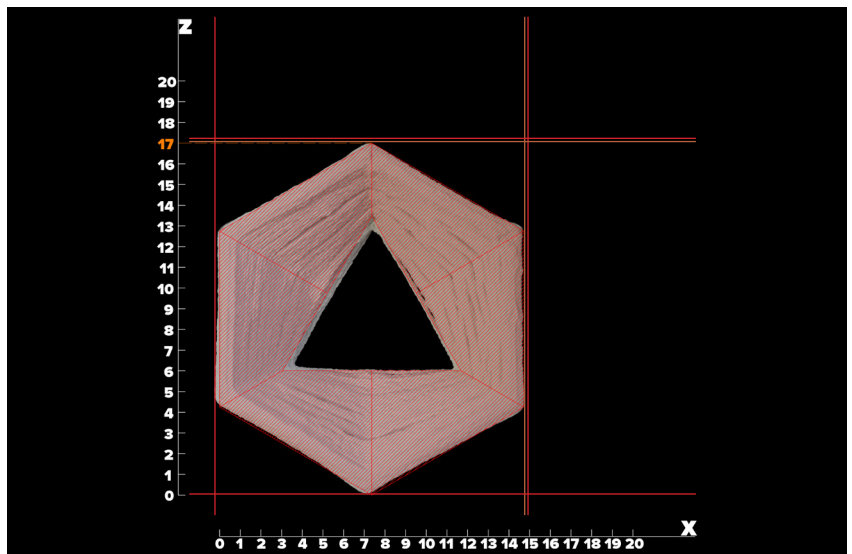
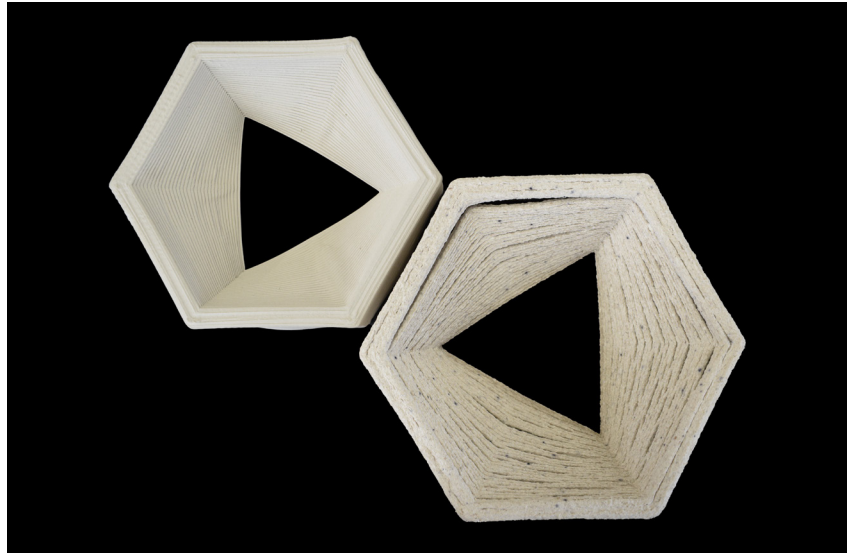
Conclui-se ainda que pela realização de estudos prévios e incorporação de compensações nas dimensões iniciais dos modelos é possível obter pelas com 5cm de altura e 17cm de comprimento. O índice de retração das peças produzidas à base de misturas de celulose é inferior ao índice das peças em argila. A forma como a humidade é extraída da peça, também é um fator que leva à retração do material, as variações bruscas da temperatura resultam em perdas diferenciadas, acentuando a retração.



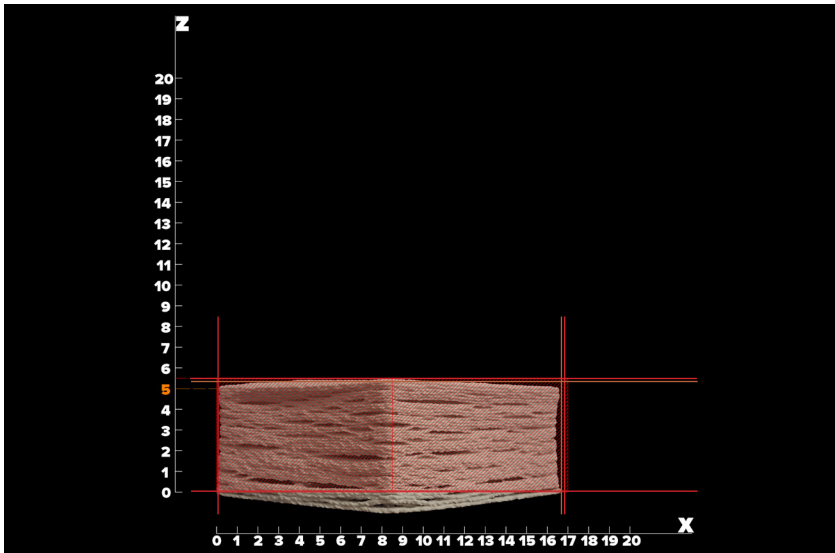
**Figura 5.38.** Estudo de retração das peças, primeiro teste de impressão.

**Figura 5.39.** Estudo de retração das peças, segundo teste de impressão.

**Figura 5.40.** Retração da peça fabricada com a mistura B, na impressão e após secagem, no comprimento.



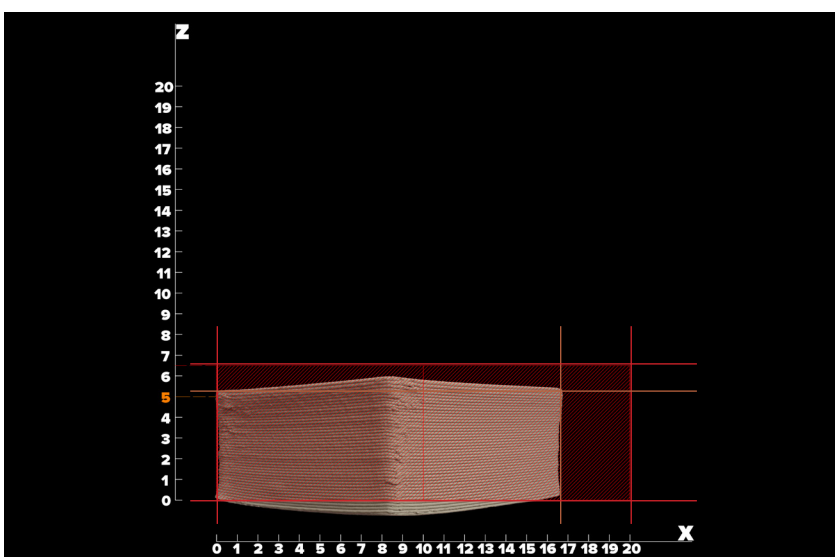
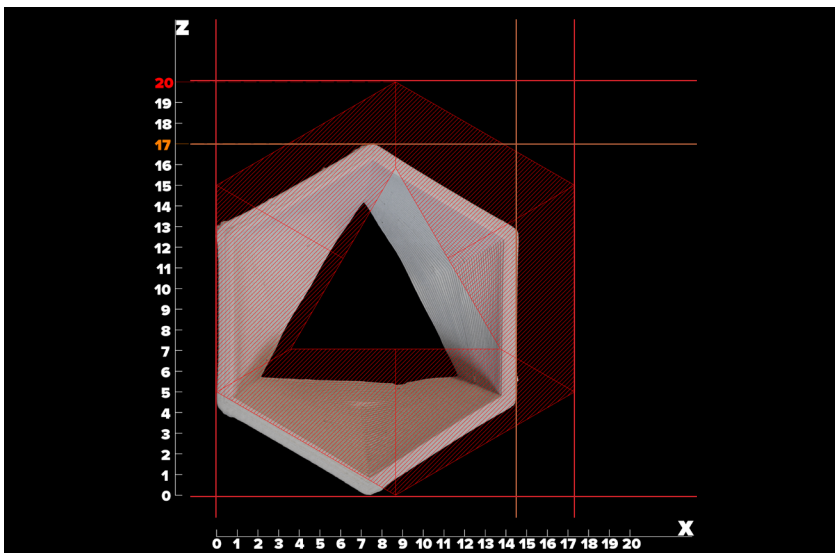




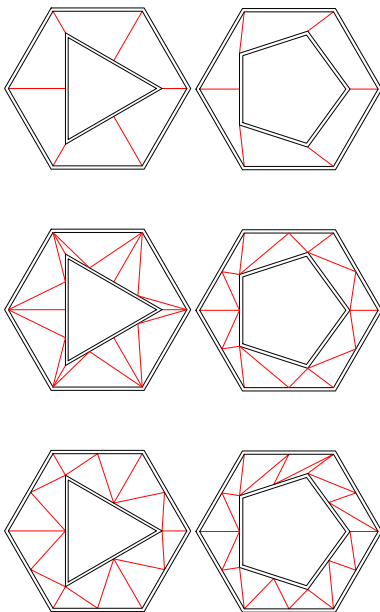
**Figura 5.41.** Retração da peça fabricada com a mistura B, na impressão e após secagem, na altura.

**Figura 5.42.** Retração da peça fabricada com a mistura D, na impressão e após secagem, no comprimento.

**Figura 5.43.** Retração da peça fabricada com a mistura D, na impressão e após secagem, na altura.



## 5.4.2.2. Estudo da Deformação



**Figura 5.44.** Fases de estudo para eliminação da deformação das peças, (1) paredes internas fase inicial, (2) paredes internas para primeira correção, (3) paredes internas para segunda correção e fase final.

O estudo da deformação das peças referentes a amostra selecionada para a produção do protótipo de parede, foi uma fase igualmente relevante para que fosse possível conjugar os múltiplos módulos.

*“Shrinkage during firing impacts all clays and clay bodies but tends to be much less in dry-processed parts compared to plastic-processed parts, again due to initial moisture content and particle size. Deformation or warping is also possible during firing and it typically accounted in part design kiln positioning, and the use of removable support structures that hold cantilevering or unsupported areas”* (Bechtold, 2015).

Aquando a fabricação das peças referentes ao primeiro teste realizado para o estudo da retração, foi possível verificar, além da excessiva retração, as constantes deformações da peça nomeadamente nas paredes para sustentação contínua dos outros módulos constituintes. Quando desenvolvido o desenho do modelo paramétrico, de acordo com a Figura 5.44, pensava-se que devido à presença de uma parede dupla e às paredes internas a vermelho, da fase inicial, seriam suficientes para controlar as deformações causadas durante a secagem. De facto, após a secagem verificou-se a continuação de existência de deformações, nomeadamente nas paredes hexagonais de ambas as peças, esta deformação também se verificou nas paredes pentagonais da peça superior. Uma vez que o objetivo era a fabricação de peças semelhantes ao desenho computacional, tentou-se solucionar as deformações visíveis nas faces pentagonais, independentemente de estabelecerem contacto com outras ou não, como observado na Figura 5.45.

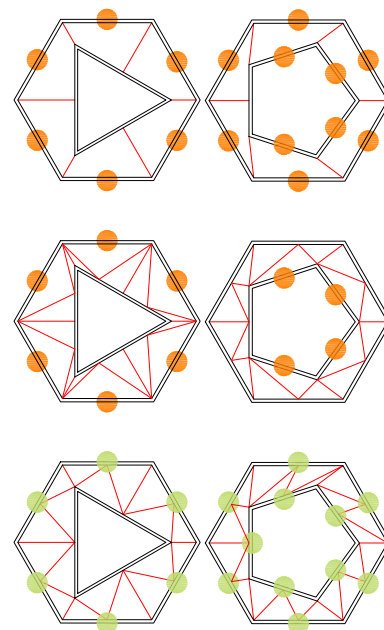
Para solucionar este problema, introduziu-se no interior de ambas as peças, paredes internas agrupadas às existentes, com o objetivo que criar uma maior estabilidade à forma após a sua secagem. A solução adotada para as peças inferiores (abertura triangular) não obteve resultados satisfatórios, pois as paredes hexagonais eram aquelas que maior deformações apresentavam. Visto que as paredes triangulares já possuíam uma ligação intermédia, foi desnecessária a anexação de uma segunda ligação intermédia. Segundo a Figura 5.45 e pelo já referido, as deformações inicialmente observadas permaneceram. Já a solução adotada para as peças superiores (abertura pentagonal) solucionou

metade das deformações observadas aquando a fabricação das peças referentes à fase inicial de estudo, Figura 5.45. A introdução de paredes secundárias às existentes permitiu que a deformação anteriormente verificada nas paredes hexagonais desaparece-se. O mesmo não foi verificado nas paredes internas pentagonais sendo que a deformação manteve.

Sendo que o objetivo era solucionar as contínuas deformações, estabeleceu-se um padrão interno distinto daquele inicialmente proposto, Figura 5.44. Para as peças inferiores (abertura triangular), tendo em conta o raciocínio implementado na fase anterior, as paredes interiores anexadas, partiam do ponto central das paredes triangular, até ao ponto central das paredes hexagonais e vice-versa. Quando fabricada a peça e realizada a sua secagem, a deformação causada nas paredes hexagonais foi quase imperceptível, isto porque independentemente do material, este tende sempre a deformar nos pontos de menor suporte. Para as peças superiores (abertura pentagonal), a colocação de uma malha continua estabelecendo contacto com todos os centros das paredes hexagonais e pentagonais conseguiu resolver as deformações anteriormente não solucionadas e mantendo o mesmo princípio utilizado.

De facto, a inexistência de paredes internas, ou grelhas regulares, limita muito a obtenção de uma peça com qualidade. A introdução das paredes permite um maior controlo sobre as deformações verificadas aquando a secagem. É notória a presença das deformações ao longo de toda a peça, mas em especial nas superfícies laterais das peças, as estruturas internas dos blocos também sofrem deformações por serem constituídas por uma simples parede causando maiores variações em comparação com as paredes duplas. Todas elas resultam em variações formais sobre todo o contorno do bloco. A colocação de uma estrutura interna é uma mais valia para a obtenção de um bloco final que mantenha a forma preconizada no modelo digital.

Tendo em conta as diferentes pastas, as deformações são mais visíveis nos blocos de argila que nas peças produzidas com misturas à base de celulose, este fator deve-se também ao índice de retração da peça, pois diminui consideravelmente de volume. Estas deformações são atenuadas com a presença de fibras de celulose, mas sempre notórias se não forem devidamente controladas pela anexação de paredes internas.

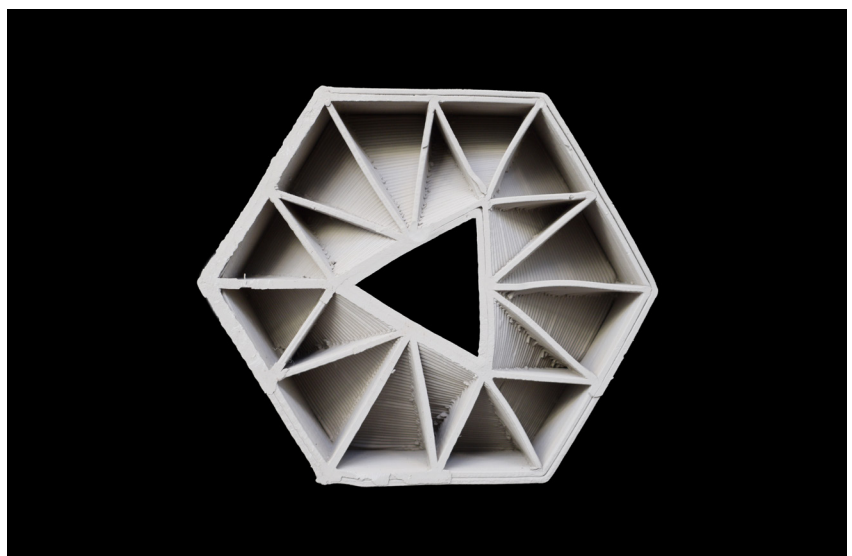
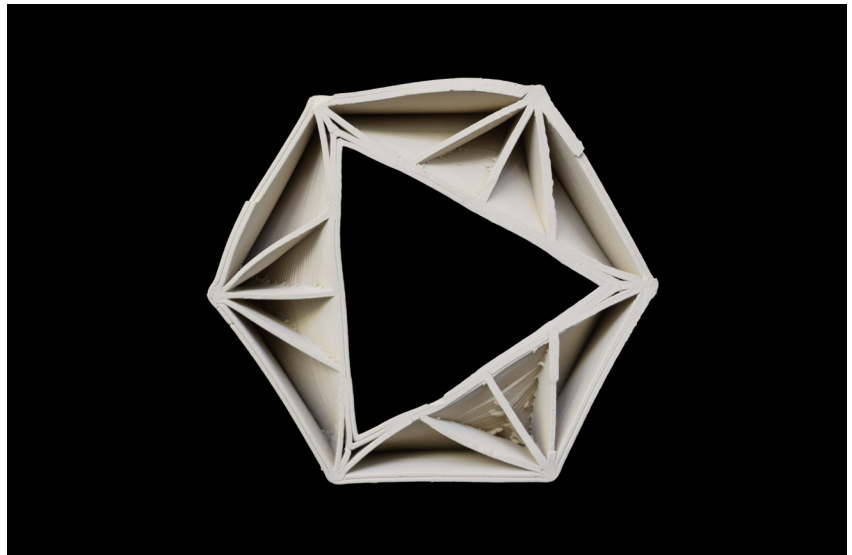
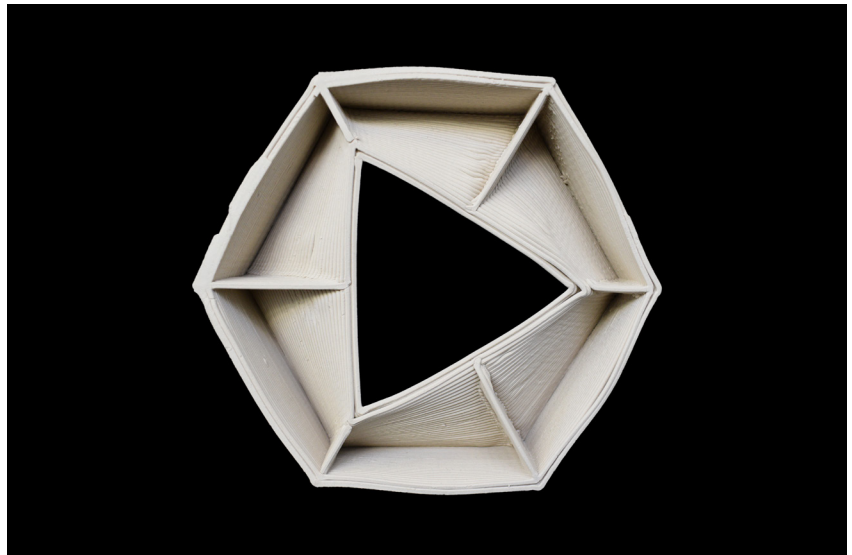


**Figura 5.45.** Deformação das peças ao longo das suas fases de execução, a 'bola' laranja paredes deformadas, a 'bola' verde paredes não deformadas.

**Figura 5.46.** Deformação das peças durante a fase inicial de trabalho.

**Figura 5.47.** Deformação das peças aquando a colocação da estrutura interna.

**Figura 5.48.** Eliminação da deformação verificada anteriormente pela indexação das paredes internas.





## 5.4.3. Acabamento

Gerado o modelo do desenho computacional, fabricadas as peças que constituem a amostra do estudo de caso, o acabamento é a fase mais dinâmica, pois é nesta que se observa o culminar de todo o estudo realizado previamente, antes e após a execução das peças em celulose e argila. De facto, o elevado controlo no ato de impressão e secagem, são os principais fatores para a obtenção de um bom acabamento. Este só foi possível ser controlado devido aos estudos apresentados, o estudo da retração e deformação. Mas o acabamento não é só a forma, é também a textura, a granulometria e a cor do material.

Quanto à textura, é interessante analisar o acabamento final das peças após a sua secagem, claro está que a textura produzida pela mistura de celulose é distinta das misturas com argila. As peças de celulose detêm uma textura muito semelhante a fios de linha, uma textura menos fina e com destacamentos entre as suas camadas, o que confere uma identidade específica a estas peças. Já as peças fabricadas com argila e celulose, o seu acabamento final é mais cuidado, cuja presença de grãos de celulose conferem uma textura interessante, semelhantes a pequenas pedras de areia branca. A textura observada no acabamento das peças transmite claramente a intenção do tema em estudo e o objetivo desta investigação, utilizando a celulose como matéria-prima.

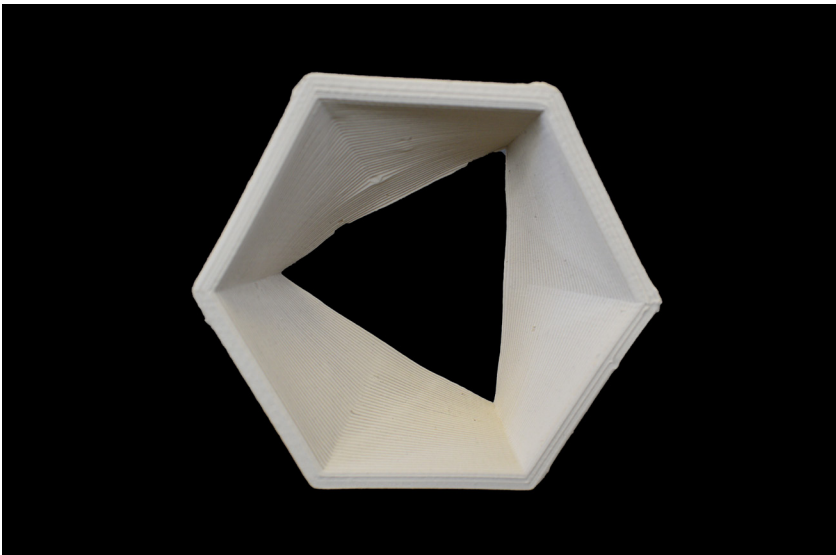
Quanto à cor, a tonalidade obtida entre todas elas é distinta, quando estas se unem umas às outras a paleta de cores observada é interessante, pois as peças produzidas com misturas à base de celulose possuem cores mais suaves, enquanto que as peças em Grés, possuem aquela tonalidade castanha muito própria do material. Se estas forem bem conjugadas quando o acabamento e montagem do produto final, esta mistura de cores potencia visualmente o estudo de caso. Este é claramente um ponto positivo no projeto, assim como a textura e o design da forma.



**Figura 5.49.** Acabamento das peças em celulose, após a secagem.

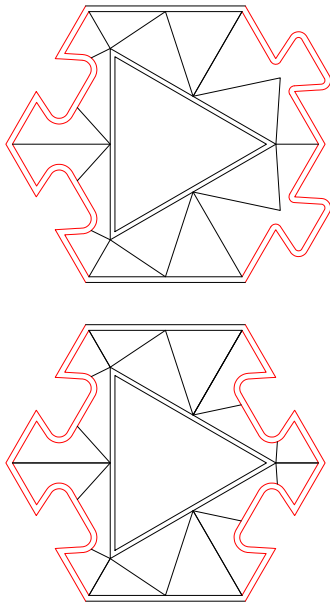
**Figura 5.50.** Acabamento das peças em argila, após a secagem.

**Figura 5.51.** Conjugação das diferentes texturas, cores e materiais no estudo de caso.

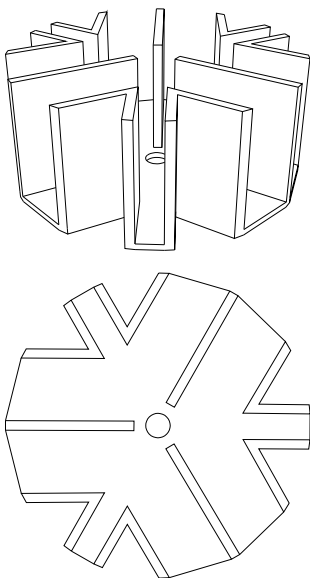




## 5.4.4. Ligações



**Figura 5.52.** Desenvolvimento dos encaixes, (1) ligação 'macho-fêmea', (2) ligação com duas fêmeas e sem macho'.



**Figura 5.53.** Desenvolvimento do encaixe exterior ao bloco.

Inerente à necessidade de realização de uma parede autoportante esta o estudo da ligação entre os seus diversos componentes. De modo a reforçar essa possibilidade, desenvolveu-se um sistema de encaixes com o intuito de garantir uma ligação entre os vários blocos.

Inicialmente esta ligação foi integrada no desenho do estudo de caso, mas uma vez que a geometria adotada, um sistema de ligação 'macho-fêmea', Figura 5.52, acabou por ser abandonado por não atingir os objetivos propostos. Isto deve-se ao facto de a retração da argila, dificultando então este sistema adotado.

Seguidamente, tirando partido do sistema acima mencionado, optou-se por colocar um sistema de ligação com duas fêmeas e sem macho, Figura 5.52, em que a peça de ligação entre ambas as ranhuras presentes na geometria poderiam ser fabricadas com variados materiais e serem exteriores aos blocos. Devido às inclinações presentes nas peças inferiores (centros triangulares) e à variação da sua forma, este sistema proposto foi reprovado, pois para as ranhuras não intersectarem as paredes dos blocos estas tinham que ter dimensões muito pequenas e quando a fabricação deixavam de ter a utilidade para que foram desenhadas.

Visando o observado anteriormente, optou-se pelo desenho de uma peça que pudesse funcionar de forma independente, Figura 5.53, sem qualquer integração no desenho dos blocos constituintes da parede. Este método de ligação permitiu que o design da forma prevalecesse e cada peça produzida para estabelecer uma ligação pudesse ser desenhada, de forma independente e adaptado consoante o conjunto de peças que alberga. Esta peça foi pensada para ser colocada ao longo dos seis vértices que definem as paredes do hexágono, geometria base para desenvolvimento das peças inferiores e superiores. Optou-se pela ligação entre vértices, por se tratar de uma zona com elevada resistência, devido à intersecção de várias paredes, e estabilidade presente nos blocos, Figura 5.53. Cada peça apresenta uma base com 5 cm de diâmetro e 2 cm de altura, inicialmente propôs-se uma altura de 4cm mas devido à inclinação presente nas paredes das peças inferiores, estas não encaixavam completamente, pelo que se diminuiu a sua dimensão. A base apresenta uma espessura de 1mm, para que possa

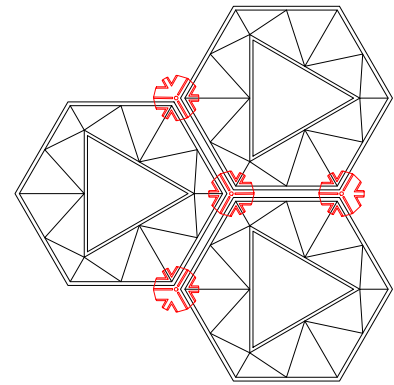
resistência e flexibilidade para adaptação às alterações das paredes dos blocos.. Produzida em FFF (Fused Filament Fabrication), técnica de FA, esta ligação tem a capacidade de se adaptar aos blocos produzidos pela presença de uma base que conecta todos os seus dentes, elos de ligação para travamento das paredes internas e externas, criando uma maior resistência e estabilidade. Uma vez que a geometria das paredes internas, como observado no subcapítulo 5.4.2.2. *Estudo da Deformação*, varia de vértice para vértice, nomeadamente nas peças superiores (centro pentagonal) foi realizado um estudo, ou contagem, onde se determina as múltiplas possibilidades de ligações. Esta contagem foi dividida em quatro grupos:

1. Três peças inferiores = 1 possibilidade
2. Duas peças inferiores e uma superior = 6 possibilidades
3. Uma peça inferior e duas superiores = 6 possibilidades
4. Três peças superiores = 2 possibilidades

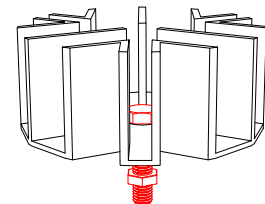
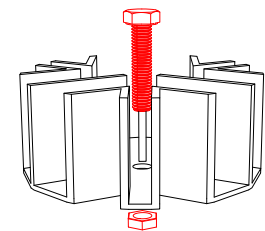
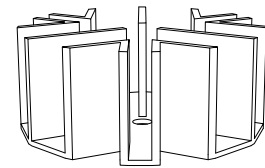
Num total calculou-se quinze peças (ligações) possíveis a desenvolver para a manipulação do estudo de caso. Se a geometria interna das peças superiores fosse semelhante entre si, caso observado nas peças inferiores, então as combinações possíveis eram inferiores às calculadas para o caso em questão.

Todas as peças foram desenvolvidas em Rhinoceros e fabricadas na impressora Delta Wasp 2040. Devido à possibilidade de personalização dos múltiplos encaixes, quando visível uma ligação entre diferentes materiais, o espaçamento entre os diversos dentes pode ser personalizado, pois muitas das vezes a espessura da parede divergia de peça para peça, isto devido a variações na fase de impressão, com maior pressão de ar aplicada ou na fase de secagem, com variações e temperaturas superiores provocando retrações diversas. As peças produzidas em celulose tendem a possuir espessuras de parede superiores às observadas nas paredes das peças em argila.

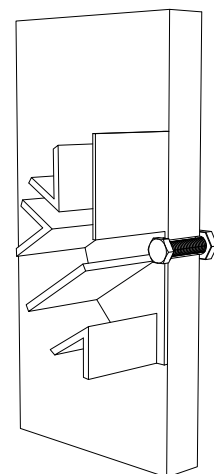
Para a montagem dos encaixes recorreu-se ao uso de um parafuso de 3mm com cabeça hexagonal, Figura 5.55, intersetando o encaixe, atravessando a placa de MDF preta utilizada para o desenvolvimento do sistema de suporte. Para ao travamento deste foi utilizado uma anilha e posterior rosca, como ilustrado na Figura 5.54.



**Figura 5.54.** Desenvolvimento do encaixe exterior ao bloco.



**Figura 5.55.** Esquema de montagem do encaixe através da colocação de um parafuso externo.

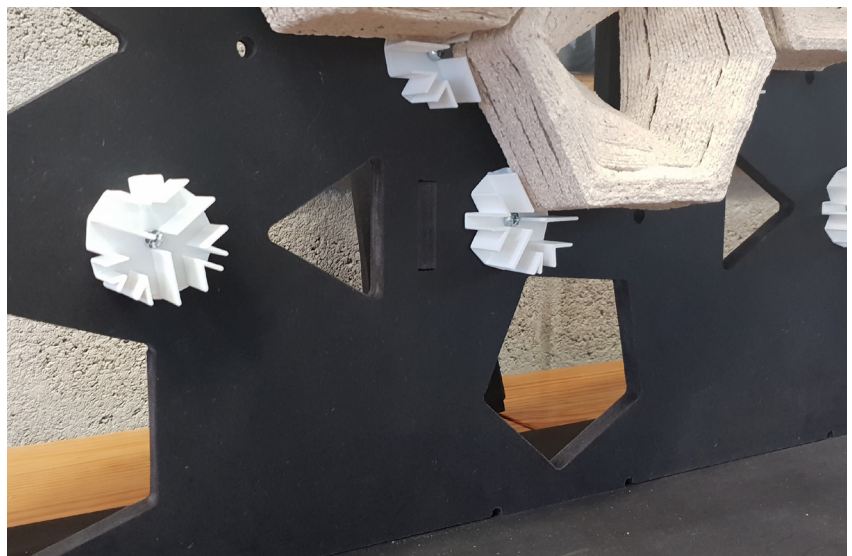
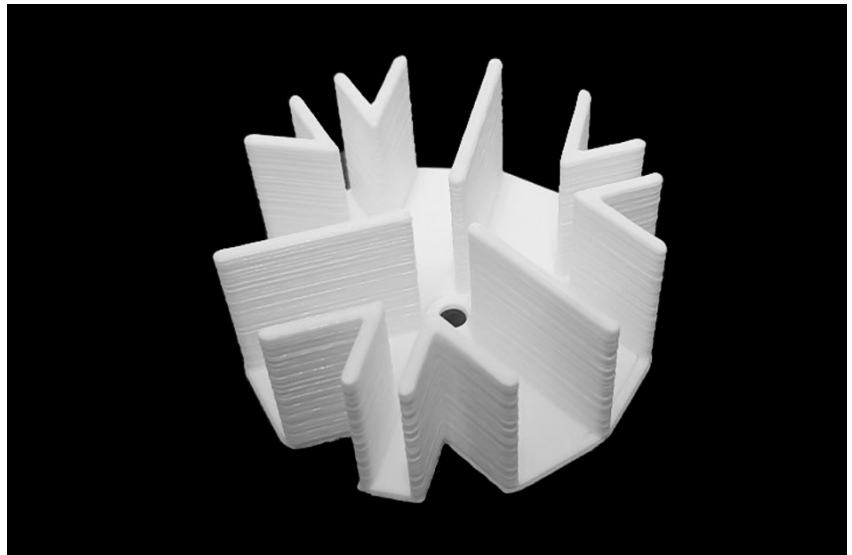
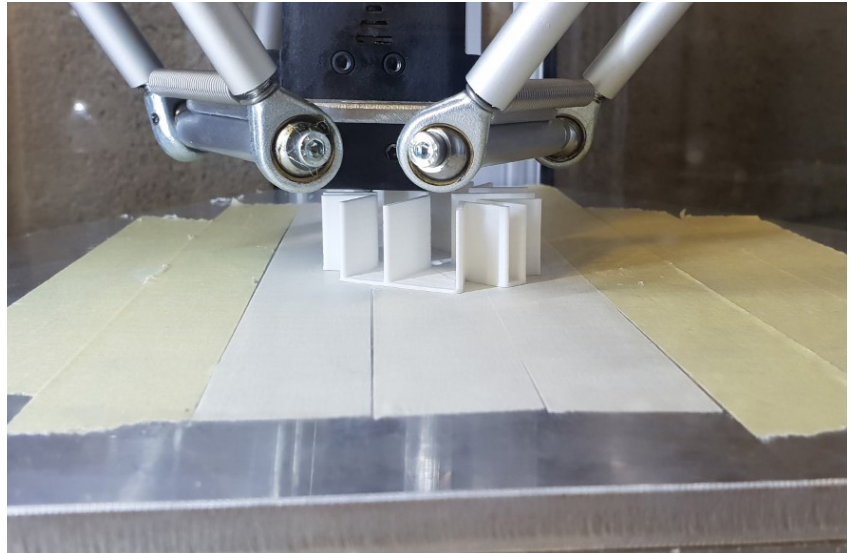


**Figura 5.54.** Esquema após a montagem, com a inclusão de um parafuso e atravessamento da placa de MDF.

**Figura 5.56.** Impressão da peça de ligação em FFF.

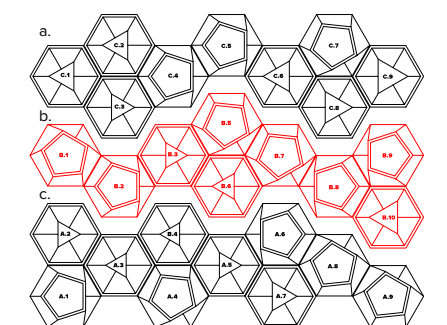
**Figura 5.57.** Peça de ligação fabricada em FFF.

**Figura 5.58.** Ligação entre os diferentes blocos constituintes da parede.

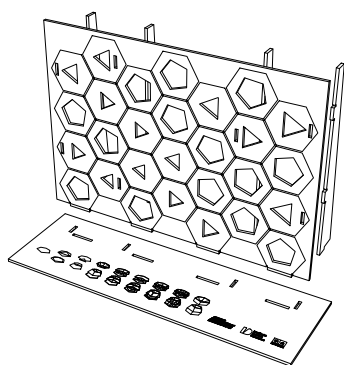




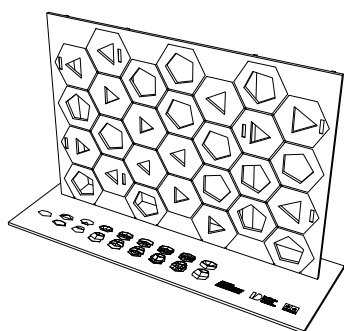
## 5.5. Desenvolvimento do Protótipo



**Figura 5.59.** Amostra do protótipo desenvolvido com designação das peças produzidas. a. Mistura B. b. Mistura B.1. c. Mistura D.



**Figura 5.60.** Demonstração de montagem do sistema de suporte criado para a sustentação da parede.



**Figura 5.61.** Sistema de suporte montado e finalizado.

Para a concretização do protótipo da parede, como já referido anteriormente foi selecionada uma amostra de estudo compreendida por 28 peças totais, em que 14 delas se referem às peças inferiores (aberturas triangulares) e 14 peças superiores (aberturas pentagonais). Dada a escolha da amostra, dividiu-se esse tramo ao longo das três misturas que demonstraram mais potencialidades - mistura B, B.1 e D - como observado na Figura 5.64. Dadas as dimensões das peças de estudo, propôs-se a idealização do protótipo à escala real.

O protótipo foi desenvolvido ao longo de duas fases, uma primeira fase referente à fabricação das peças, 9 peças produzidas com a mistura B, 10 peças com a mistura B.1 e 9 peças produzidas com pasta cerâmica com a anexação de pasta de celulose em pó com diferentes percentagens, Figura 5.59, e uma segunda fase referente à idealização do suporte para sustentação de todas as peças através da colocação de ligações externas, como já referido no subcapítulo anterior.

Peças A.1 a A.9 - Pasta de celulose em pó e amido

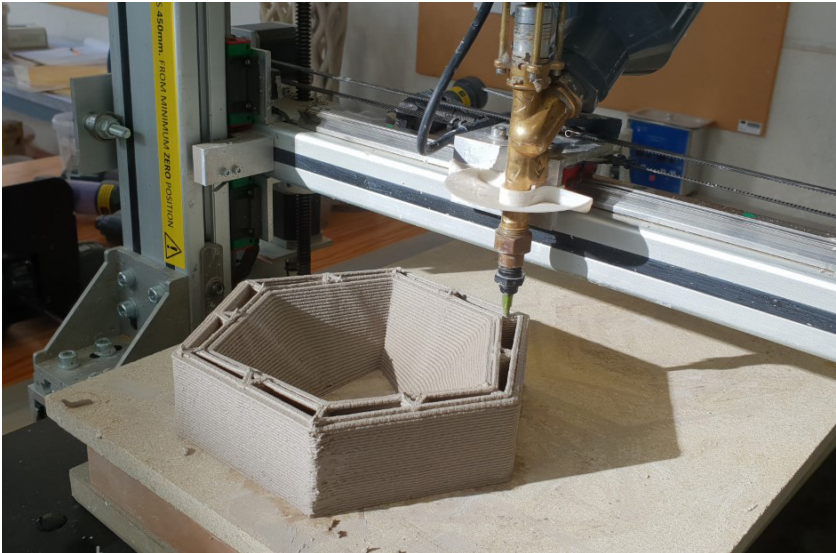
Peças B.1 a B.10 - Pasta de celulose em pó, amido e fibras de madeira

Peças C.1 a C.9 - Pasta cerâmica e pasta de celulose em pó. A percentagem de celulose varia de 0% a 5% (0%, 1%, 2,5%, 5%).

Para a produção do suporte, como indicado na Figura 5.61, pensou-se numa forma que poderia facilmente ser montada e desmontada, Figura 5.60, consistindo numa base, superfície vertical e quatro barras de suporte. Estas foram produzidas em placas de MDF preto com 10mm de espessura, recorrendo ao uso de uma outra técnica de fabricação aditiva, o corte CNC. Na placa de base, recorreu-se à gravação a laser para demonstração do processo de geração de cada peça presente na parede assim como as indicações mais relevantes acerca da mesma. O processo de montagem do protótipo da parede, considera os seguintes passos:

1. Montagem do sistema de suporte fabricado em CNC, Figura 5.64;
2. Colocação dos encaixes fabricados em FFF, Figura 5.66;
3. Colocação das peças fabricadas pela extrusão de uma pasta, Figura 5.62.





**Figura 5.62.** Fabricação das peças pertencentes à amostra de estudo selecionada.

**Figura 5.63.** Secagem em estufa das peças produzidas.

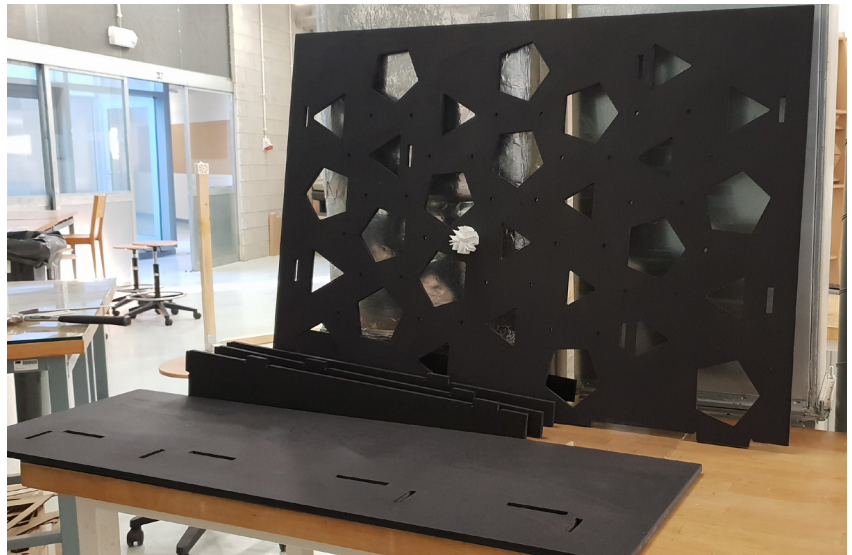
**Figura 5.64.** Produção do sistema de suporte da amostra de estudo, corte das placas de MDF preto recorrendo à CNC.



**Figura 5.65.** Observação das placas pertencentes ao sistema de suporte. Secagem do óleo aplicado.

**Figura 5.66.** Colocação dos encaixes, fixação com parafusos roscados.

**Figura 5.67.** Produto final, observação da textura e tonalidade produzida pelas diferentes misturas em estudo — Mistura B; B.1 e D. Visualização das variações introduzidas no modelo produzido.







**Figura 5.68.** Produto final, observação da textura produzida pelas diferentes misturas em estudo — Mistura B; B.1 e D.

**Figura 5.69.** Produto final, observação das peças produzidas com a mistura B e B.1. — Misturas à base de celulose e amido.

**Figura 5.70.** Peças finais, observação das peças inferiores — com abertura triangular — e peças superiores — com abertura pentagonal. Diferenciação da textura e tonalidade das peças.



**Figura 5.71.** Peça final, observação da peça inferior — com abertura triangular — produzida com a mistura B.

**Figura 5.72.** Peça final, observação da peça inferior — com abertura pentagonal — produzida com a mistura B.1.

**Figura 5.73.** Peça final, observação da peça inferior — com abertura triangular — produzida com a mistura D.

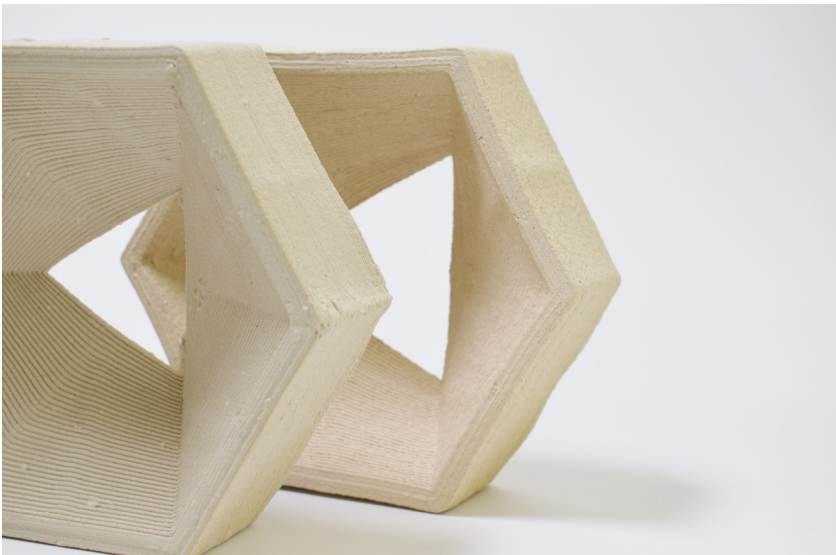




**Figura 5.71.** Peça final, observação da peça inferior — com abertura triangular — produzida com a mistura B.

**Figura 5.72.** Peça final, observação da peça inferior — com abertura pentagonal — produzida com a mistura B.1.

**Figura 5.73.** Peça final, observação da peça inferior — com abertura triangular — produzida com a mistura D.



## 6. Conclusão

O presente capítulo demonstra os resultados mais relevantes desta investigação, mostrando as principais contribuições para a integração de FA na produção de componentes arquitetónicos em materiais à base de misturas de celulose. No essencial, a investigação centrou-se na definição e calibração de misturas para FA por LDM, e ainda, na concretização de um estudo de caso demonstrativo de novos métodos de fabricação e produção de componentes arquitetónicos. Do estudo realizado ao longo desta investigação foi possível concluir:

1. Na última década, a evolução tecnológica permitiu um avanço sem precedentes no campo das técnicas de fabrico aditivo. Este avanço ocorre no sentido de um maior controlo e qualidade das mesmas, mas também, numa maior facilidade de acesso a utilizadores não especializados a este tipo de equipamentos, tanto pelo decréscimo de custo, como por possuírem softwares e interfaces de utilização cada vez mais intuitiva.

2. A utilização das pastas de celulose é uma área ainda em desenvolvimento. Alguns dos estudos realizados nesta área têm como objetivo a utilização de celulose e o papel como materiais construtivos, e a sua subsequente valorização se comparados com materiais com maior impacto ambiental. Algumas das técnicas retratadas neste investigação têm este intuito, nomeadamente pela produção de modelos tridimensionais com elevado grau de pormenor, outras foram adaptadas para o uso do papel ou celulose, como retratado ao longo desta investigação.

3. A possibilidade de combinação entre diferentes materiais, como a celulose, amido e argila, permitiu gerar diversas misturas, assim como aferir qual o comportamento mais adequado quando aplicado no contexto em estudo. Inicialmente, levantaram-se dúvidas sobre a possibilidade de utilização de pasta de celulose em folha devido à granulometria observada nos grãos de celulose transformadas. Quando descoberta a melhor forma de contornar este fator, permanência da pasta de celulose à temperatura ambiente para evaporação de uma percentagem do teor de humidade presente, a sua aplicação alcançou alguns dos objetivos propostos inicialmente. Os testes realizados com a pasta de celulose em pó permitiram verificar que esta mistura têm um bom comportamento, se comparada com a pasta de celulose em folha.



Estas pastas quando misturadas com outros materiais apresentaram comportamentos diferentes. As misturas que incorporaram ágar-ágar e acetona não alcançaram os resultados pretendidos, devido à falta de plasticidade e viscosidade, as misturas com amido ao contrário do esperado mostraram resultados ótimos.

4.Quando definidas misturas que poderiam apresentar melhores resultados, teve-se em consideração que deveriam possuir determinados comportamentos, como boa fluidez para extrusão, trabalhabilidade para produção e exequibilidade para aplicação em contextos reais. A agregação e mistura dos diferentes materiais, resultou de um pensamento lógico, todas as misturas deveriam possuir um material base – a celulose - um material viscoso – o amido ou a argila – e ou um material sólido – fibras de madeira. Respondendo aos dois primeiros parâmetros definidos a mistura era propícia para aplicação no FA.

5.Cada uma das misturas propostas foi submetida a três fases de trabalho, com o objetivo de testar a trabalhabilidade e potencialidade de aplicação no FA. A primeira pelo recurso a uma seringa para extrusão das diferentes misturas em estudo, consistiu na geração de provetes que permitiram aferir as misturas com melhor trabalhabilidade, e respectivas proporções de materiais incorporadas nas mesmas. A segunda fase de trabalho, realizada após a primeira ser bem sucedida, no estudo individual de cada mistura, teve o intuito de descobrir limitações das misturas – A, B, B.1, C e D. A terceira de fase trabalho, apresentava um grau de complexidade superior ao qual somente responderam bem as mistura B, B.1 e D. Esta fase compreendia a produção de componentes mais complexos, como as peças AM Aalto e a fabricação de um bloco arquitetónico. O objetivo desta fase A ideia desta fase era testar a mistura quando aplicada na produção de componentes arquitetónicos. Tendo em conta todas as misturas de celulose estudadas, aquela que melhores resultados apresentou foi a mistura B.1, demonstrando que a incorporação de fibras de madeira melhora o seu comportamento, se comparado com as misturas A e B. Tendo em conta todas as misturas de argila estudadas, aquela que melhores resultados apresentou foi a mistura D. Concluiu-se que as misturas com pasta de celulose em pó apresentaram resultados superiores aos observados com as misturas à base de pasta de celulose transformada, como a resistência da peça, facilidade de impressão, a textura granulosa mais suavizada, a trabalhabilidade da pasta quando utilizada na produção de modelos mais complexos.

6.Como já enunciado, na primeira fase de trabalho eram realizados testes e provetes com o objetivo de testar a exequibilidade da mistura quando aplicada no FA. Este estudo baseou-se em grande parte no controlo da fluidez do material quando validado. Nas misturas à base de celulose – misturas A, B e B.1 – o controlo da quantidade de amido anexado permitiu atenuar outros fatores verificados numa fase posterior, a secagem. Nas misturas à base de argila, pela presença das pastas de celulose, a fluidez da pasta muitas das vezes era alterada devido à celulose anexada. A pasta de celulose transformada aumentava consideravelmente o teor de humidade presente na mistura, o inverso

ocorre quando incorporada pasta de celulose em pó. Se esta continha um teor de humidade superior ao descoberto, a qualidade de produção dos modelos era posta em causa, o mesmo acontecia quando o teor de humidade era inferior, a pasta ao ser extrudida gerava modelos com grandes defeitos e outra estabilidade.

7. Uma das maiores restrições na utilização de pasta de celulose é a necessidade de serem preparadas no momento antes da sua utilização, caso contrário a pasta começa a secar perdendo as propriedades que a torna favorável para FA. O amido necessita de ser utilizada ainda quente, pois se este for armazenado durante algum tempo começa a decompor-se, aparecendo fungos e bolor. Já nas misturas à base de celulose e argila, uma vez que a celulose é um material absorvente e a argila necessita de um certo grau de humidade para garantir uma boa trabalhabilidade, quando armazenadas, a celulose e a argila geram uma reação que no ato de impressão cria crateras e deformações na peça produzida. Este fator era intensificado quando utilizada pasta de celulose em folha, os grãos perdiam água e muitas das vezes levavam ao entupimento do bico de extrusão, gerando impressões pouco cuidadas ou incompletas.

8. A fase de secagem foi aquela que mais conclusões permitiu obter no FA. Devido ao estado de decomposição iniciado pelo amido, como referido anteriormente, a secagem das peças fabricadas com misturas à base de celulose foi realizada em estufa, permitindo a sua realização em temperaturas constantes e superiores a 35°C. Quando utilizadas misturas à base de celulose e argila é aconselhável a sua secagem em estufa e se estas estiverem sujeitas a variações de temperatura excessivas então a secagem em estufa deve ser mesmo realizada por forma a diminuir retrações, deformações ou fissurações elevadas. A presença da celulose atenua os fatores descritos mas não os elimina na totalidade, atenua deformações e diminui o índice de retração quanto maior for a percentagem de fibras de celulose, apesar de ser um valor mínimo. O cozimento foi uma das fases que mais dúvidas gerou, pelo facto de a celulose se tratar de um material combustível, esse fator foi totalmente eliminado pois a celulose apresenta um comportamento excelente depois de cozida a argila. Interessante é o seu aspeto final, pois assume uma textura semelhante a pequenos grãos de areia brancos.

9. A retração observada nas misturas à base de celulose é totalmente diferente da observada nas misturas à base de celulose e argila, isto porque a primeira tende a retrair em altura pela perda de água o volume do objeto diminui quando se dá a secagem, levando a consequências como a laminação ou destacamento entre camadas. Como já referido anteriormente, a segunda – misturas à base de celulose e argila – a presença de fibras de celulose não elimina a retração do material, este dá-se de igual forma ao verificado num objeto produzido com pasta de argila sem celulose. As fibras atenuam possíveis deformações e fissurações nas zonas mais frágeis, diminuindo o peso bruto da peça e aumentando a sua capacidade de resistência.



10. Para controlar melhor as deformações presentes nas misturas criadas, nomeadamente nas misturas à base de celulose e amido, foram pensadas peças com estruturas internas, aumentando a quantidade de contatos estabelecidos entre paredes para que no ato de secagem o índice de deformação seja diminuído. A deformação é verificada em ambas as misturas, mas devido à presença de fibras de celulose nas peças de argila, estas respondem de uma melhor forma a estes parâmetros.

11. O acabamento gerado após a utilização das diferentes misturas e conseqüentemente após a secagem, diverge de pasta para pasta, sendo mais notório um aspecto descuidado e tosco quando utilizada pasta de celulose em folha transformada, isto porque a granulometria dos grãos de celulose é superior ao verificado na pasta de celulose em pó. Sempre que utilizada pasta de celulose em pó, o seu aspecto final é mais cuidado. A quantidade de amido incorporada nas pastas de celulose influencia muito a tonalidade esbranquiçada do material, quanto maior é a sua percentagem, maior é o seu tom amarelado. A presença de fibras de madeira também é um forte influenciador na tonalidade adquirida pela peça, pois esta adquire o tom das fibras, se a madeira demonstra tonalidades mais claras então a peça adquire um tom mais claro, se esta possuir fibras mais escuras então a peça adquire tonalidades mais escuras. A quantidade de fibras de madeira também influencia em muito a tonalidade do objeto devido à concentração na mistura. Quanto às peças à base de celulose e argila, a presença da celulose altera um pouco a tonalidade adotada pelo grés, passando a tons mais claros que o proposto.

12. As ligações foram propostas com o objetivo de unir os módulos do estudo de caso, respondendo bem às misturas de celulose e amido e misturas de argila e celulose. Uma vez que era do interesse explorar o campo das ligações também foram pensados encaixes integrados na forma da peça produzida, devido ao índice de retração este parâmetro foi excluído, adotando-se por encaixes independentes à peça produzida.

Em suma, conclui-se que todas as misturas apresentaram comportamentos diferentes quando aplicados em determinados contextos. As misturas à base de celulose apresentaram um comportamento e trabalhabilidade excelente para FA. O acabamento destas pastas ficaram aquém do observado ao longo da sua utilização, pela observação do destacamento e laminação das paredes das peças. Observadas as três pastas de celulose, aquela que mais vantagens apresentou foi a mistura B.1, pela presença de fibras de madeira que atenuaram a laminação e deformações visíveis na mistura B. Quando enunciadas as misturas de argila, a mistura D superou as expectativas pretendidas, resultando em modelos com qualidade. Considera-se que a investigação e resultados apresentados neste trabalho permitem afirmar que, não obstante à necessidade de aprofundamento de um conjunto de temas, existe um grande potencial e interesse na integração de materiais compósitos à base de celulose em processos de FA de componentes arquitetónicos.

## 6. CONCLUSÃO

# 6.1. Trabalhos futuros

Tendo em conta os resultados obtidos ao longo desta investigação, propõe-se um conjunto de trabalhos futuros que poderão dar continuidade esta pesquisa utilizando a pasta de celulose como material de estudo a aplicar no FA. Estes trabalhos baseiam-se:

1.A descoberta de uma nova forma de utilização e aplicação da pasta de celulose em folha transformada para a produção de componentes arquitetónicos e aplicação em arquitetura.

a)A alteração da composição da mistura, pela descoberta de novos materiais com comportamento semelhante ao amido.

b)A trituração da pasta de celulose em folha transformada, após a sua transformação recorrendo a mecanismos apropriados, com o objetivo da obtenção de uma pasta mais homogénea e com grãos de celulose com granulometrias inferiores.

c)A produção de malhas de resistência planas ou curvas, fabricadas em variadas superfícies, como plásticos, ou aplicados determinados componentes, sprays, colas, líquidos antiaderentes, com o objetivo de após a secagem o modelo não se agarre às placas utilizadas onde colocado o modelo.

d)A aplicação da pasta de celulose em folha recorrendo a técnicas de fabrico aditivo, por processos de ligação, como SLA ou SLS, excluindo processos de deposição, onde ocorre a extrusão da pasta.

e)A utilização da pasta de celulose combinada com outros materiais para a aplicação em processos de modelação, criando componentes arquitetónicos através de moldes previamente fabricados utilizando outras técnicas de fabrico aditivo.

f)Realização de estudos de resistência, como flexão, tração e compressão do material, para cada mistura desenvolvida, nomeadamente para as pastas à base de celulose.

2.Reformulação das misturas à base de celulose e amido com o intuito de diminuir o fenómeno de destacamento observado ao longo do estudo individual das misturas. Este fenómeno pode ser removido ou melhorado com a anexação de um terceiro ou quarto material às misturas, com função de colagem entre as diferentes camadas.

3. Integração de encaixes nos modelos produzidos, sejam elas internos ou externos, através da geração de formas mais complexas.

4. A manipulação de novos tipos de modelos realizando um conjunto de testes de retração, flexão e compressão com o objetivo de testar o comportamento deste material.

5. A aplicação da pasta de celulose em ambientes reais, através da produção de componentes arquitetónicos e a sua aplicação num ambiente sujeito a variações climáticas.

6. A utilização da pasta de celulose aplicada em ambientes com uma acústica e térmica variável, verificando o seu comportamento através de diferentes estudos realizados. Comprovação do material para aplicação de revestimento interior acústico ou térmico.

Em suma, todos os trabalhos aqui propostos têm como objetivo levar a cabo o estudo das pastas à base de celulose a um campo semelhante à argila, explorando diversas vertentes da sua utilização, como a introdução das pasta de celulose num tipo de fabrico aditivo diferente ao proposto.





## 7. Bibliografia

Bechtold, Martin. Kane, Anthonny. King, Nathan. *Ceramic Material Systems: in architecture and interior design*. Basel: Birkhäuser GmbH, 2015.

Carvalho, João A.N. *Cerâmica 3D: Sistemas digitais para a personalização do desenho e fabrico de componentes arquitetónicos*. Universidade do Minho. 2018.

Cool brick: <http://www.emergingobjects.com/project/cool-brick/>, 2015.

Cruz, Paulo. Knaack, Ulrich. Figueiredo, Bruno. Witte, Dennis De. (2017) *Ceramic 3D printing – The future of brick architecture*. Country report prepared for the Lab 2PT, Escola de Arquitetura, Universidade do Minho, Faculty of Architecture and the Built Environment, Delft University of Technology, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Technische Universität Darmstadt. Disponível em [www.repositorium.sdum.uminho.pt](http://www.repositorium.sdum.uminho.pt), data de consulta 07/03/2018

Davidson, Stephanie; Rafailidis, Georg. (2018) *Pulp: experiments in thin shell, cast paper structures addressing form finding, fabrication, structural behavior and decay*. Country report prepared for the State University of New York at Buffalo, Department of architecture. Disponível em [www.ias2018.org](http://www.ias2018.org), data de consulta 19/07/2018

Dun, Nick. Huang, Alvin. Richards, Daniel. (2018). *Polybrick 3.0: live signatures through DNA hydrogels*. Rapid Manufacturing. Editorial. Vol.7, Nos.2/3 (pp. 201-207). 2018.

Duro-Royo, Jorge. Van Zak, Josh. Ling, Andrea. Tai, Yen-Ju. Hogan, Nicolas. Darweesh, Barrak. Oxman, Neri. *Designing a tree: Fabrication Informed Digital Design and fabrication of Hierarchical Structures*. Country report prepared for The mediated Matter Group, MIT Media Lab, Department of Architecture and Urban Planning. Disponível em [www.ias2018.org](http://www.ias2018.org), data de consulta 19/07/2018

Gault, Rosette. *The new ceramics paperclay art and practice*. 1st ed. New York: Herbert Press. 2013.

Gossel, Peter. Leuthauser, Gabriele. *Arquitetura no Século XX*. 1st ed. Solvenia: Tashen. 2005.

Hauschild, Moritz. Rudiger, Karzel. *Digital Processes: Planning Design*



*Production*. 1st ed. Munich: Edition Detail. 2011.

Latka, Jerzy F.; *Architecture and the Built environment - Paper in architecture: Research by design, engineering and prototyping*. (2017) Research prepared for Delft University of Technology, Faculty of Architecture and the Built Environment and Department of Architectural Engineering + Technology.

Lopes, Leonor M. S. *O papel do papel hoje face à tecnologia digital*. Universidade de Coimbra. 2010.

Mashrabiya 2.0: <https://erinlhunt.com/mashrabiya-20>. 2018

MELO, Arnaldo, F. A. *O papel como elemento de identificação*. Lisboa: Oficinas gráficas da biblioteca nacional. 1926.

Naldoni, Lapo. Casarotto, Alberto. Eriolo, Alessio. (2018) *Temporary shell systems based on robotic mud deposition*. Country report prepared for Department of Architecture, School of Architecture and Engineering, University of Bologna. Disponível em [www.iass2018.org](http://www.iass2018.org), data de consulta 19/07/2018

Knaack, Ulrich. Klein, Tillmann. Bilow, Marcel. Auer, Thomas. *Principles of construction*. 2nd and revised ed. Basel: Birkhäuser GmbH, 2014.

Rael, Ronald. San Fratello, Virginia. *Printing Architecture Innovative Recipes for 3D Printing*. 1st ed. New York: Princeton Architecture Press. 2018.

Redwood, Ben. Schoffer, Filemon. Garret, Brian. *The 3D printing Handbook: Technologies, design and applications*. 3D Hubs. 2nd ed. Amsterdam: Coers&Roest. 2017.

Rosenthal, M. et al. 2017. Liquid Deposition Modeling: a promising approach for 3D printing in wood. *European Journal of Wood and Wood Products*. Volume 76 (Issue 2): pp 797-799.

Seed Stich Wall: <http://www.emergingobjects.com/project/seed-stitch/>, 2016.

Siquiera, Gilberto. Kokkinis, Dimitri. Libanori, Rafael. Hausmann, Michael K. Gladman, Amelia Sydney. Neels, Antonia. Tingaut, Philippe. Zimmermann, tanja. Lewis, Jennifer A. Studart, André R. (2017) *Cellulose Nanocrystal Inks for 3D Printing of Textured Cellular Architectures*. Country report prepared for Wood Materials Laboratory and Center for X-ray Analytics Empa –Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology, Complex Materials Department of Materials, School of Engineering and Applied Sciences and Wyss Institute for Biologically Inspired Engineering Harvard University Cambridge. Disponível em [www.advancedsciencenews.com](http://www.advancedsciencenews.com), data de consulta 12/03/2018

Sultan, Sahar. Siquiera, Gilberto. Zimmermann, Tanja. Mathew, Aji P. (2017) *3D printing of nano-cellulosic biomaterials for medical applications*. Country report prepared for Department of Materials and Environmental Chemistry, Applied Wood Materials Laboratory. Disponível em [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com), data de consulta 12/03/2018

Odin Wall: <https://www.aclab-idegui.org/copy-of-1-wave-wall-v-2>, 2016.

Peters, Brian. (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.

Pfaffli, Marja-Sisko Llvessalo. *Fiber Atlas: Identificacion of papermaking fibers*. 1st ed. New York: Springer. 1995.

Tai, Yen-Ju T. Bader, Christoph. Ling, Andrea S. Disset, Jean. Darweesh, Barrak. Duro-Royo, Jorge. Van Zak, Josh. Hogan, Nicolas. Oxman, Neri. (2018) *Designing (for) Decay: Parametric Material Distribution for Hierarchical Dissociation of water-based biopolymer composites*. Country report prepared for The mediated Matter Group, MIT Media Lab, Department of Architecture and Urban Planning. Disponível em [www.iass2018.org](http://www.iass2018.org), data de consulta 19/07/2018

Warnier, Clarie; Verbruggen, Dries; Ehmann, Sven; Klanten, Robert. *PRINTING THINGS: Visions and essentials for 3D printing*. 1st ed. Berlin: Gestalten. 2014.

## Webgrafia

'*Studio woojai:PAPERBRICKS*'. Woojai Lee. Disponível em: <http://www.woojai.com/paperbricks.html> (data de consulta: 27/12/2017)

'*Future buildings to be 3D printed out of rubber tires, salt, paper & more – Ronald Rael's real 2015 presentation*'. Eddie Krassenstein. Disponível em: <https://3dprint.com/75047/3d-printed-architecture/> (data de consulta: 28/11/2017)

'*Emerging Objects: Seed Stitch*'. Emerging Objects. Disponível em: <http://www.emergingobjects.com/project/seed-stitch/> (data de consulta: 28/11/2017)

'*Building Bytes: 3D printed bricks*'. Building Bytes. Disponível em: <http://buildingbytes.info> (data de consulta: 20/10/2017)

'*Projetos humanitário de Shigeru Ban*'. AD Editorial Team. Disponível em: <https://www.archdaily.com.br/br/01-185116/projetos-humanitarios-de-shigeru-ban> (data de consulta: 16/11/2017)

'*Mcor 3D printing opens vast new possibilities for paper-loving artist*'. Clare Goddard. Disponível em: [http://www.mcor technologies.com/mcor-3d-printing-opens-vast-new-possibilities-for-paper-loving-artist\\_trashed/](http://www.mcor technologies.com/mcor-3d-printing-opens-vast-new-possibilities-for-paper-loving-artist_trashed/) (data de consulta: 26/11/2017)

'*You can fake a color 3D print using paper in this instructable*'. Michelle Matisons. Disponível em <https://3dprint.com/103300/fake-color-3d-print-with-paper/> (data de consulta: 27/11/2017)

'*Paper-based 3D printing lets parents give their baby a one-of-a-kind gift*'. Ujjal Mitra. Disponível em: [http://www.mcor technologies.com/paper-based-3d-printing-lets-parents-give-their-baby-a-one-of-a-kind-gift\\_\\_](http://www.mcor technologies.com/paper-based-3d-printing-lets-parents-give-their-baby-a-one-of-a-kind-gift__)

trashed/ (data de consulta: 26/11/2017)

'MIT Researchers Create new cellulose 3D Printing Process and Print Antimicrobial Surgical Toll'. Disponível em: <https://3dprint.com/166978/mit-cellulose-3d-printing/> (data de consulta: 06/03/2018)

'Cellulose from wood can be printed in 3D'. Paul Gatenholm. Disponível em: <https://www.chalmers.se/en/departments/chem/news/Pages/Cellulose-from-wood-can-be-printed-in-3D.aspx> (data de consulta: 06/03/2018)

'3D Printing with cellulose'. Disponível em: <http://news.mit.edu/2017/3-d-printing-cellulose-0303> (data de consulta 07/05/2018)

'Empa researchers develop eco-friendly cellulose 3D printing ink.' Clare Scott. Disponível em: <https://3dprint.com/176489/empa-cellulose-3d-printing-ink/> (data de consulta 07/05/2018)

'Bagasse fibers as bioink: research shows that sugarcane waste is suitable for 3D printing'. Disponível em: <https://3dprint.com/204910/bagasse-fibers-bioink-research/> (data de consulta 07/05/2018)

'Researchers 3D print using electrically conductive, carbon nanotube infused, cellulose – Potential for many futuristic uses'. Whitney Hipolite. Disponível em: <https://3dprint.com/73925/3d-printing-cellulose/> (data de consulta 07/05/2018)

'Sweden launches +Project to 3D print Houses out of Cellulose'. Eddie Krassenstein. Disponível em: <https://3dprint.com/76838/3d-printed-cellulose-houses/> (data de consulta 07/05/2018)

'Using cellulose to 3D print food'. Disponível em: <https://3dprint.com/129633/cellulose-3d-print-food/> (data de consulta 07/05/2018)

'3D printer filament'. Disponível em: <http://www.arborbiokaps.com/MATERIALI-EN.htm> (data de consulta 07/05/2018)

'MIT 3D prints plant materials with antibacterial properties'. Beau Jackson. Disponível em: <https://3dprintingindustry.com/news/mit-3d-prints-plant-materials-antibacterial-properties-107200/> (data de consulta 07/05/2018)

'Papel artesanal de fibras vegetais'. Disponível em: <http://www.kamoriarte.com.br/cana.htm> (data de consulta 08/03/2018)

'História da tipografia'. Disponível em: <http://www.tipografos.net/historia/index.html> (data de consulta 08/03/2018)

'Microfibrillated Cellulose'. Disponível em: <https://materia.nl/material/exilva/> (data de consulta 13/03/2018)

'MIT develops method to 3D print abundant natural polymer cellulose'. Disponível em: <https://3dprintingindustry.com/news/s-develops-method-3d-print-abundant-natural-polymer-cellulose-123342/> (data de consulta: 15/03/2018)

'Cellulose a promising material for 3D food printing'. Disponível em: <https://3dprintingindustry.com/news/cellulose-a-promising-material-for->

3d-food-printing-76306/ (data de consulta: 15/03/2018)

*'Highcon shape, construction with paper'*. Disponível em: <https://3dprintingindustry.com/news/highcon-shape-construction-paper-82155/> (data de consulta: 15/03/2018)

*'Sweden embarks on \$4 million project to 3D print homes from cellulose'*. Disponível em: <https://3dprintingindustry.com/news/sweden-embarks-on-4-million-project-to-3d-print-homes-from-cellulose-52151/> (data de consulta: 15/03/2018)

*'2D printing press expands to 3D paper printing with Mcor'*. Disponível em: <https://3dprintingindustry.com/news/2d-printing-presses-expand-3d-paper-printing-mcor-30279/> (data de consulta: 15/03/2018)

*'3D paper printing for speedy slot cars'*. Disponível em: <https://3dprintingindustry.com/news/3d-paper-printing-speedy-slot-cars-29271/> (data de consulta: 15/03/2018)

*'3D printing material – Rock, paper...salt'*. Disponível em: <https://3dprintingindustry.com/news/3d-printing-material-rock-paper-salt-12023/> (data de consulta: 15/03/2018)

*'Indústria põe cada vez mais celulose nos alimentos'*. Disponível em: <http://www.geoambiente.com.br/blog/2011/05/19/industria-poe-cada-vez-mais-celulose-nos-alimentos/> (data de consulta: 19/03/2018)



## 8. Anexos





**Anexo 1.** Fabricação dos cones truncados com pasta de celulose em folha transformada e amido.



**a.** Cilindro



**b.** Cone truncado com 20° de curvatura



**c.** Cone truncado com 25° de curvatura



**d.** Cone truncado com 30° de curvatura

**Anexo 2.** Fabricação dos cones truncados com pasta de celulose em pó branqueado e amido.



**a.** Cilindro



**b.** Cone truncado com 20° de curvatura



**c.** Cone truncado com 25° de curvatura



**d.** Cone truncado com 30° de curvatura



**e.** Cone truncado com 35° de curvatura



**f.** Cone truncado com 40° de curvatura



**g.** Cone truncado com 45° de curvatura



**h.** Cone truncado com 50° de curvatura

**Anexo 3.** Fabricação dos cones truncados com pasta de celulose em pó branqueado, amido e fibras de madeira.



**a.** Cilindro



**b.** Cone truncado com 20° de curvatura



**c.** Cone truncado com 25° de curvatura



**d.** Cone truncado com 30° de curvatura



**e.** Cone truncado com 35° de curvatura



**f.** Cone truncado com 40° de curvatura



**g.** Cone truncado com 45° de curvatura



**h.** Cone truncado com 50° de curvatura

**Anexo 4.** Fabricação dos cones truncados com pasta cerâmica.



**a.** Cilindro



**b.** Cone truncado com 20° de curvatura



**c.** Cone truncado com 25° de curvatura



**d.** Cone truncado com 30° de curvatura



**e.** Cone truncado com 35° de curvatura



**f.** Cone truncado com 40° de curvatura



**g.** Cone truncado com 45° de curvatura



**h.** Cone truncado com 50° de curvatura

**Anexo 5.** Fabricação dos cones truncados com pasta cerâmica e 1% de pasta de celulose em pó branqueada.



**a.** Cilindro



**b.** Cone truncado com 20° de curvatura



**c.** Cone truncado com 25° de curvatura



**d.** Cone truncado com 30° de curvatura



**e.** Cone truncado com 35° de curvatura



**f.** Cone truncado com 40° de curvatura



**g.** Cone truncado com 45° de curvatura



**h.** Cone truncado com 50° de curvatura

**Anexo 6.** Fabricação dos cones truncados com pasta cerâmica e 2,5% de pasta de celulose em pó branqueada.



**a.** Cilindro



**b.** Cone truncado com 20° de curvatura



**c.** Cone truncado com 25° de curvatura



**d.** Cone truncado com 30° de curvatura



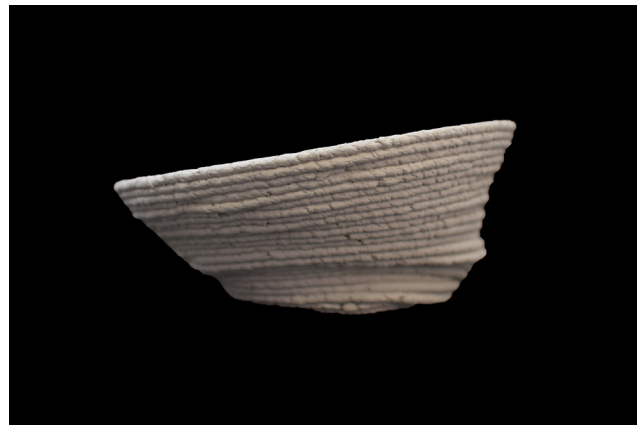
**e.** Cone truncado com 35° de curvatura



**f.** Cone truncado com 40° de curvatura



**g.** Cone truncado com 45° de curvatura



**h.** Cone truncado com 50° de curvatura



**Anexo 7.** Fabricação dos cones truncados com pasta cerâmica e 5% de pasta de celulose em pó branqueada.



**a.** Cilindro



**b.** Cone truncado com 20° de curvatura



**c.** Cone truncado com 25° de curvatura



**d.** Cone truncado com 30° de curvatura



**e.** Cone truncado com 35° de curvatura



**f.** Cone truncado com 40° de curvatura



**g.** Cone truncado com 45° de curvatura



**h.** Cone truncado com 50° de curvatura

**Anexo 8.** Fabricação dos cones truncados com pasta cerâmica e 7,5% de pasta de celulose em pó branqueada.



**a.** Cilindro



**b.** Cone truncado com 20° de curvatura



**c.** Cone truncado com 25° de curvatura



**d.** Cone truncado com 30° de curvatura



**e.** Cone truncado com 35° de curvatura



**f.** Cone truncado com 40° de curvatura



**g.** Cone truncado com 45° de curvatura



**h.** Cone truncado com 50° de curvatura

**Anexo 9.** Fabricação dos cones truncados com pasta cerâmica e 2,5% de pasta de celulose em folha transformada húmida.



**a.** Cilindro



**b.** Cone truncado com 20° de curvatura



**c.** Cone truncado com 25° de curvatura



**d.** Cone truncado com 30° de curvatura



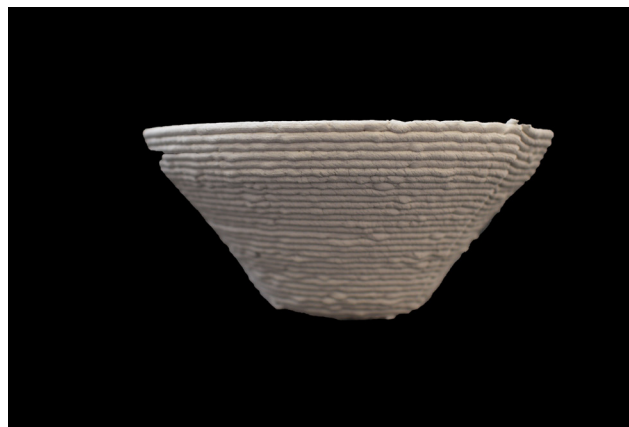
**e.** Cone truncado com 35° de curvatura



**f.** Cone truncado com 40° de curvatura



**g.** Cone truncado com 45° de curvatura



**h.** Cone truncado com 50° de curvatura

**Anexo 10.** Fabricação dos cones truncados com pasta cerâmica e 5% de pasta de celulose em folha transformada húmida.



**a.** Cilindro



**b.** Cone truncado com 20° de curvatura



**c.** Cone truncado com 25° de curvatura



**d.** Cone truncado com 30° de curvatura



**e.** Cone truncado com 35° de curvatura



**f.** Cone truncado com 40° de curvatura



**g.** Cone truncado com 45° de curvatura



**h.** Cone truncado com 50° de curvatura

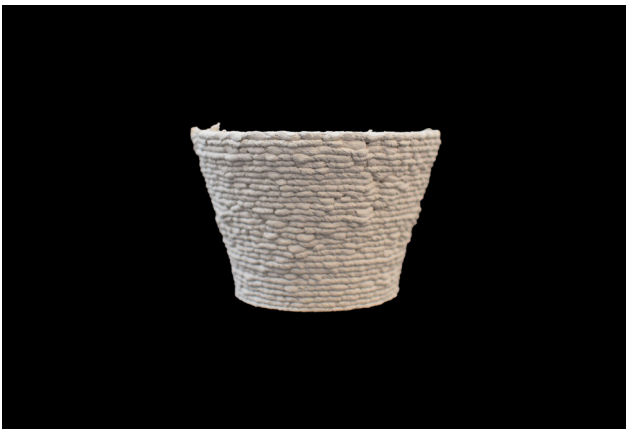
**Anexo 11.** Fabricação dos cones truncados com pasta cerâmica e 7,5% de pasta de celulose em folha transformada húmida.



**a.** Cilindro



**b.** Cone truncado com 20° de curvatura



**c.** Cone truncado com 25° de curvatura



**d.** Cone truncado com 30° de curvatura



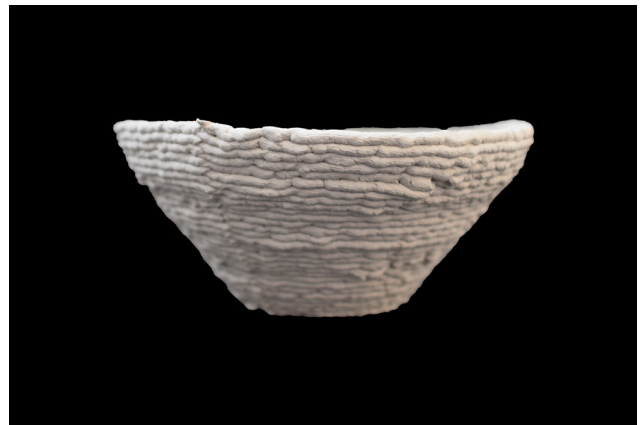
**e.** Cone truncado com 35° de curvatura



**f.** Cone truncado com 40° de curvatura



**g.** Cone truncado com 45° de curvatura



**h.** Cone truncado com 50° de curvatura



**Anexo 12.** Fabricação dos cones truncados com pasta cerâmica e 10% de pasta de celulose em folha transformada húmida.



**a.** Cilindro



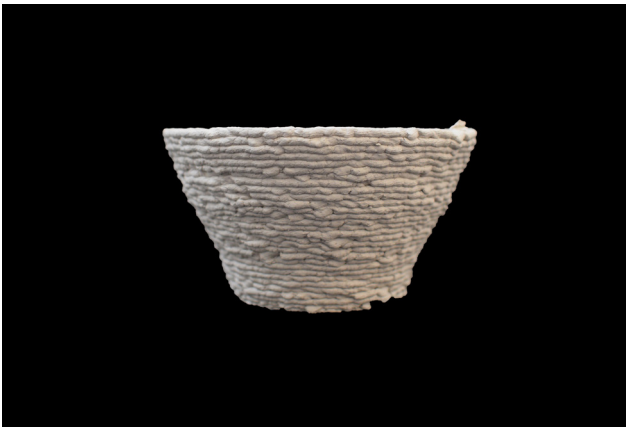
**b.** Cone truncado com 20° de curvatura



**c.** Cone truncado com 25° de curvatura



**d.** Cone truncado com 30° de curvatura



**e.** Cone truncado com 35° de curvatura



**f.** Cone truncado com 40° de curvatura



**g.** Cone truncado com 45° de curvatura



**h.** Cone truncado com 50° de curvatura

**Anexo 13.** Fabricação dos cones truncados com pasta cerâmica e 2,5% de pasta de celulose em folha transformada seca.



**a.** Cilindro



**b.** Cone truncado com 20° de curvatura



**c.** Cone truncado com 25° de curvatura



**d.** Cone truncado com 30° de curvatura



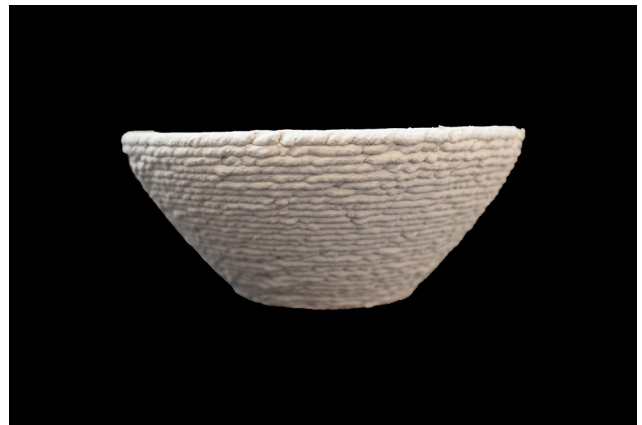
**e.** Cone truncado com 35° de curvatura



**f.** Cone truncado com 40° de curvatura



**g.** Cone truncado com 45° de curvatura



**h.** Cone truncado com 50° de curvatura



**Anexo 14.** Fabricação dos cones truncados com pasta cerâmica e 5% de pasta de celulose em folha transformada seca.



**a.** Cilindro



**b.** Cone truncado com 20° de curvatura



**c.** Cone truncado com 25° de curvatura



**d.** Cone truncado com 30° de curvatura



**e.** Cone truncado com 35° de curvatura



**f.** Cone truncado com 40° de curvatura



**g.** Cone truncado com 45° de curvatura

**Anexo 15.** Fabricação dos cones truncados com pasta cerâmica e 7,5% de pasta de celulose em folha transformada seca.



**a.** Cilindro



**b.** Cone truncado com 20° de curvatura



**c.** Cone truncado com 25° de curvatura



**d.** Cone truncado com 30° de curvatura



**e.** Cone truncado com 35° de curvatura



**f.** Cone truncado com 40° de curvatura



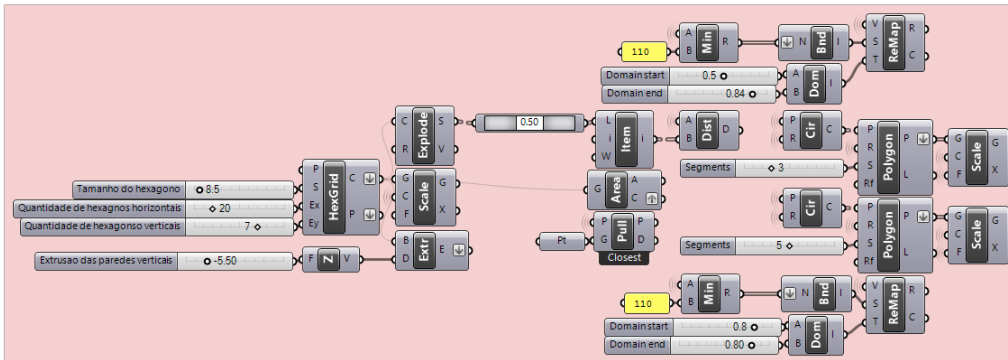
**g.** Cone truncado com 45° de curvatura



**h.** Cone truncado com 50° de curvatura

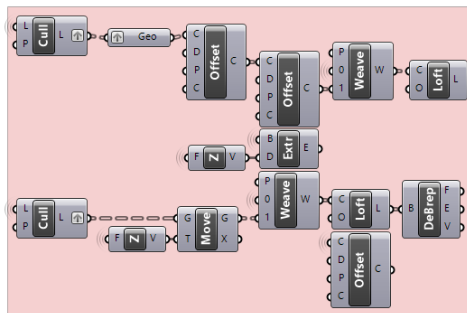
**Anexo 16.** Definição do modelo computacional paramétrico. Geração do código em Grasshopper, plug-in inserido no Rhinoceros, para as peças produzidas com pasta de celulose em pó branquada ou pasta de celulose em folha transformada.

**Fase 1.** Geração da malha hexagonal e suas variações.

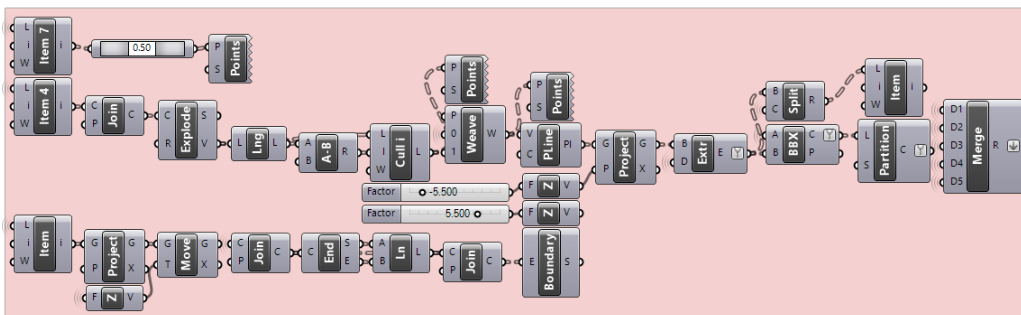


**Fase 2.** Geração das pirâmides truncadas inferiores, com iniciação nas superfícies exteriores e posterior geração das paredes internas.

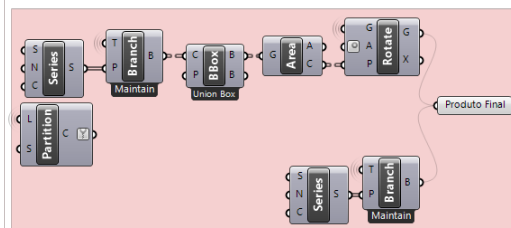
**Fase 2.a.** Geração das superfícies exteriores.



**Fase 2.b.** Geração das paredes internas.

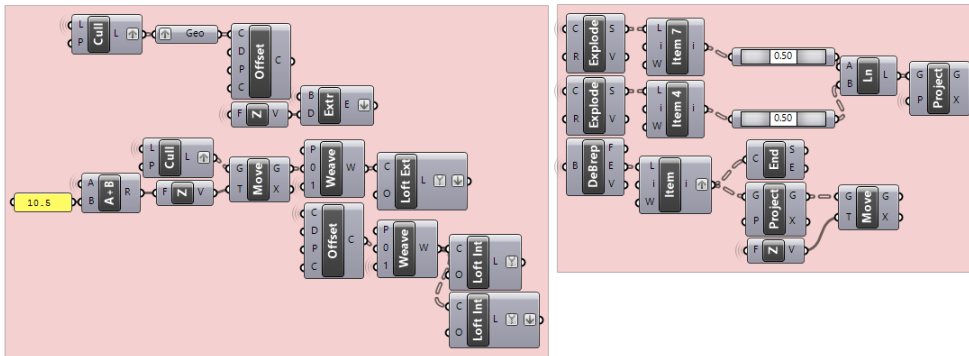


**Fase 2.c.** Rotação das pirâmides truncadas inferiores.

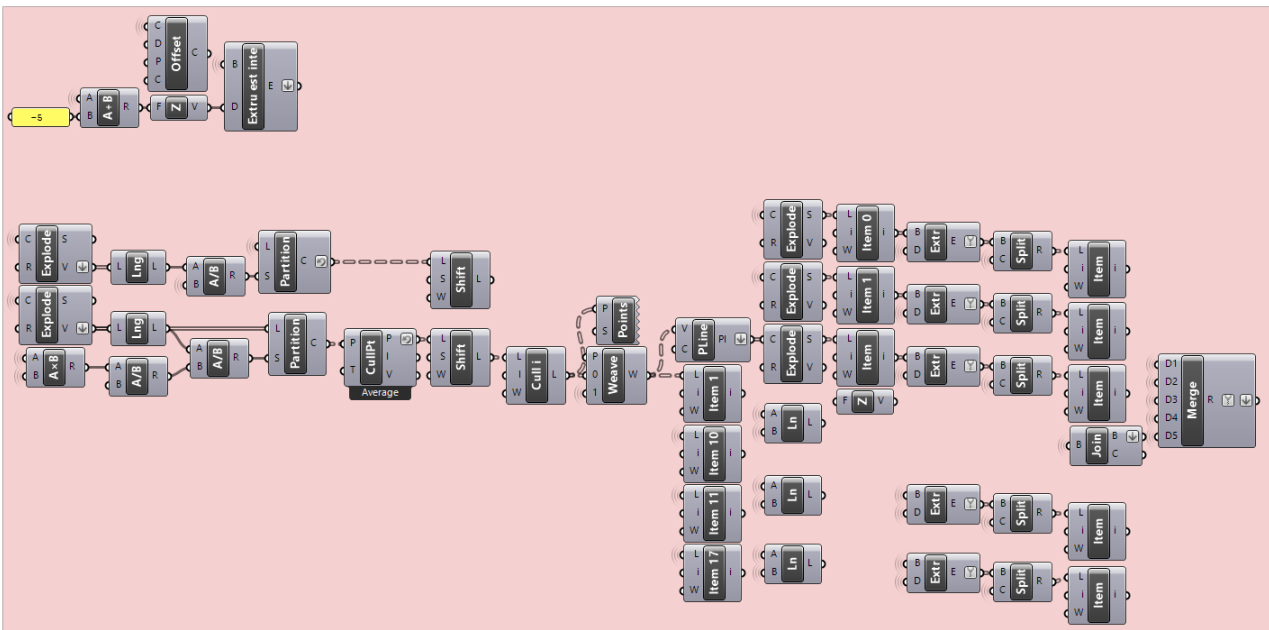


**Fase 3.** Geração das pirâmides truncadas superiores, com iniciação nas superfícies exteriores e posterior geração das paredes internas.

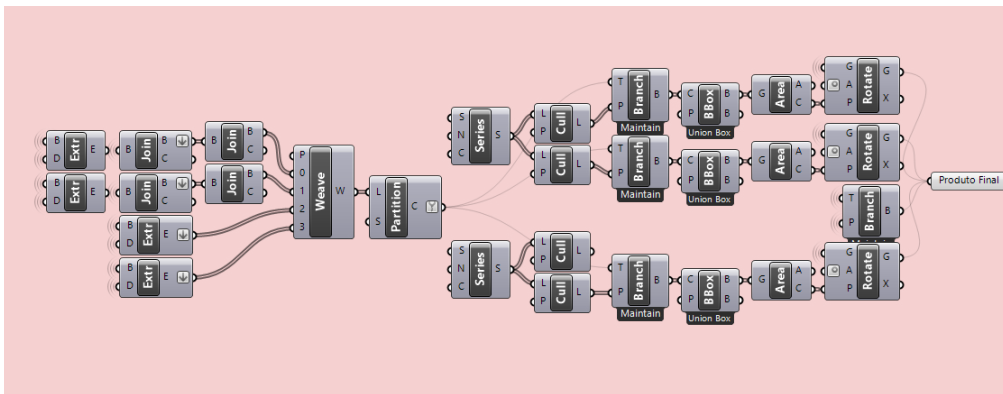
**Fase 3.a.** Geração das superfícies exteriores.



**Fase 3.b.** Geração das paredes internas.

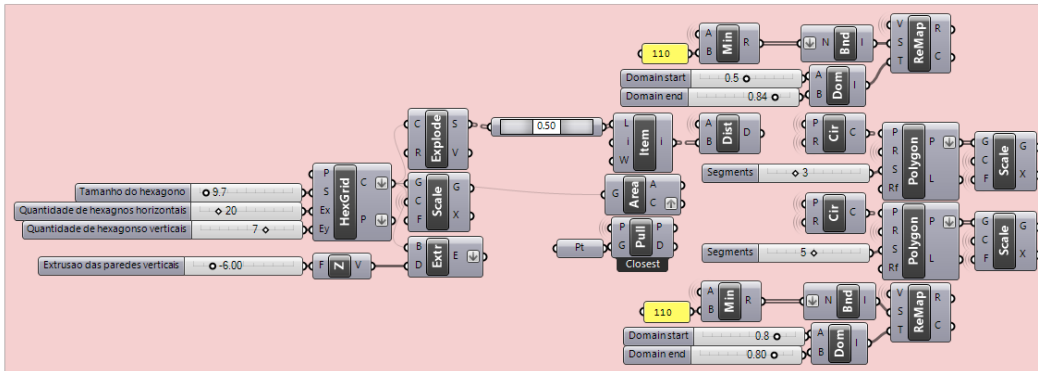


**Fase 3.c.** Rotação das pirâmides truncadas superiores.



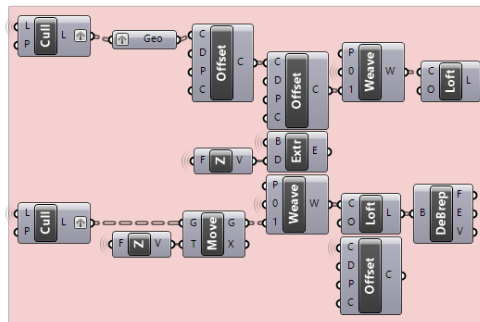
**Anexo 17.** Definição do modelo computacional paramétrico. Geração do código em Grasshopper, plug-in inserido no Rhinoceros, para as peças produzidas com pasta de celulose em pó branquada e pasta de cerâmica, argila do tipo GRES 130 MP.

**Fase 1.** Geração da malha hexagonal e suas variações.

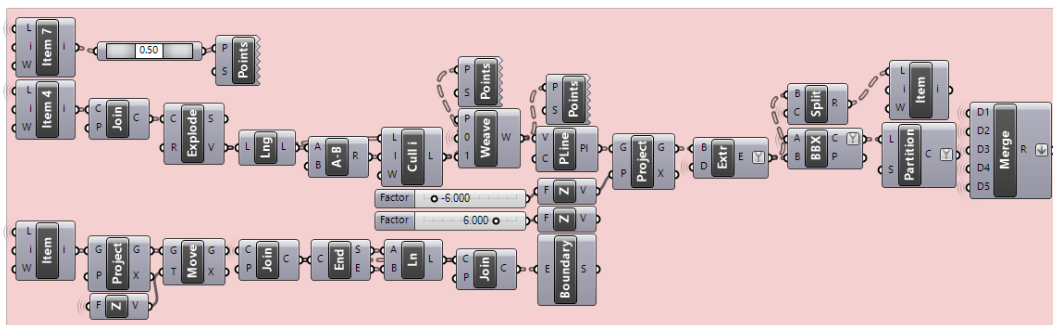


**Fase 2.** Geração das pirâmides truncadas inferiores, com iniciação nas superfícies exteriores e posterior geração das paredes internas.

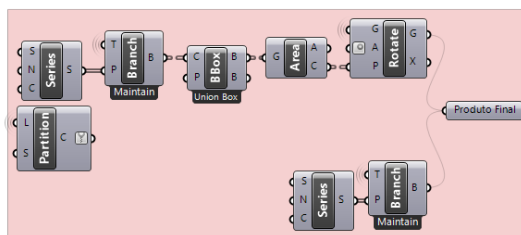
**Fase 2.a.** Geração das superfícies exteriores.



**Fase 2.b.** Geração das paredes internas.

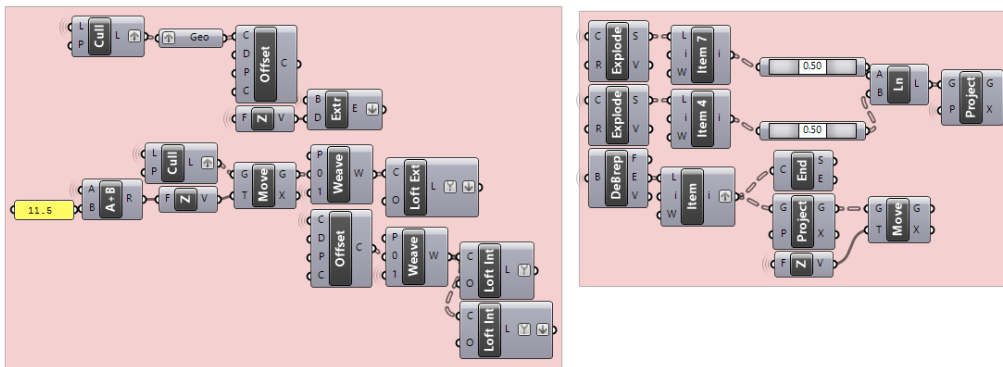


**Fase 2.c.** Rotação das pirâmides truncadas inferiores.

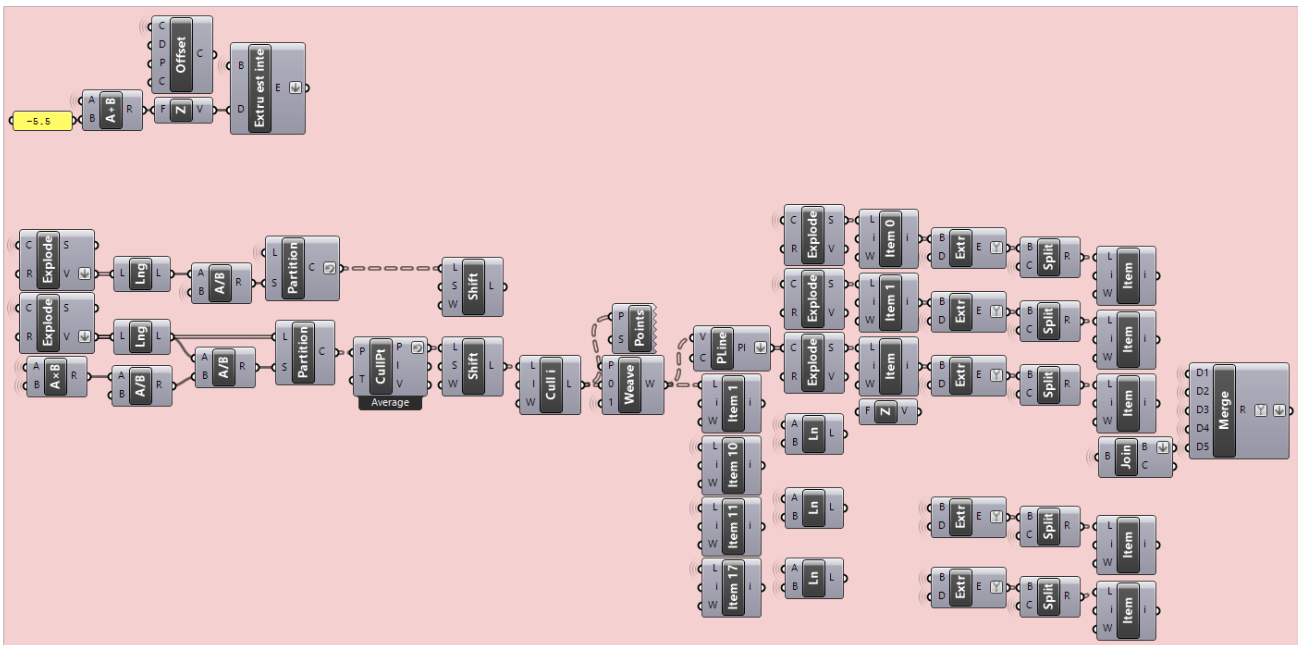


**Fase 3.** Geração das pirâmides truncadas superiores, com iniciação nas superfícies exteriores e posterior geração das paredes internas.

**Fase 3.a.** Geração das superfícies exteriores.



**Fase 3.b.** Geração das paredes internas.



**Fase 3.c.** Rotação das pirâmides truncadas superiores.

