



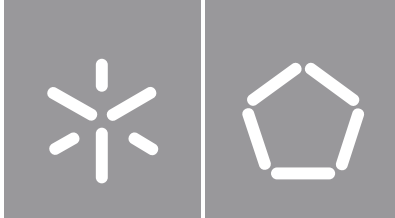
**Universidade do Minho**

Escola de Engenharia

Samuel Armando Oliveira Ribeiro

**Otimização de pastas cerâmicas para  
processos de extrusão por fabricação  
aditiva e respetiva caracterização do  
comportamento mecânico**





**Universidade do Minho**

Escola de Engenharia

Samuel Armando Oliveira Ribeiro

**Otimização de pastas cerâmicas para  
processos de extrusão por fabricação  
aditiva e respetiva caracterização do  
comportamento mecânico**

Dissertação de Mestrado  
Mestrado em Engenharia do Produto

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

# Direitos de autor e condições de utilização do trabalho por terceiros

Este é um trabalho académico que pode ser utilizado por terceiros desde que respeitadas as regras e boas práticas internacionalmente aceites, no que concerne aos direitos de autor e direitos conexos.

Assim, o presente trabalho pode ser utilizado nos termos previstos na licença abaixo indicada.

Caso o utilizador necessite de permissão para poder fazer um uso do trabalho em condições não previstas no licenciamento indicado, deverá contactar o autor, através do RepositóriUM da Universidade do Minho.



Atribuição-NãoComercial-SemDerivações  
CC BY-NC-ND

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>



# Agradecimentos

Começo com um agradecimento especial aos orientadores desta tese o Professor Paulo Cruz e ao Professor Bruno Figueiredo, pelo apoio, disponibilidade e companheirismo demonstrado ao longo desta investigação.

Ao João Carvalho, com quem tenho orgulho em colaborar e o acompanhar na investigação e no desenvolvimento de novos projetos, pela ajuda, disponibilidade e amizade.

À direção do Instituto de Design de Guimarães, pela oportunidade cedida em realizar o Mestrado em Engenharia do Produto e aos coordenadores do ACLab pelo desenvolvimento desta investigação.

À minha e esposa Isabel e à minha filha Maria Luísa, que nasceu e cresceu durante a realização do mestrado.

Aos meus pais, irmã, sogros e Ana, pela disponibilidade e compreensão.

# **Declaração de integridade**

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho académico e confirmo que não recorri à prática de plágio nem a qualquer forma de utilização indevida ou falsificação de informações ou resultados em nenhuma das etapas conducente à sua elaboração.

Mais declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.

# Resumo

A fabricação aditiva (FA) é uma designação frequente dos processos de impressão 3D de um modelo físico, por camadas, a partir de um modelo digital tridimensional com geometria precisa e usando a quantidade exata de material – sem desperdício e sem a necessidade de utilização de outros instrumentos ou ferramentas.

A presente dissertação restringe-se à exploração da FA por extrusão de pastas cerâmicas. As especificidades da criação dos produtos com este tipo de processo, exige o profundo conhecimento dos materiais cerâmicos, prevendo e controlando o seu comportamento em todas as fases, nomeadamente durante a secagem e cozedura.

A utilização de diferentes pastas cerâmicas implicou a necessidade de explorar soluções adequadas à criação de produtos arquitetónicos, analisando diferentes parâmetros e variáveis do processo de FA.

Este estudo dá particular ênfase à otimização das pastas cerâmicas para processos de extrusão por FA. Recorre-se ao método de Pfefferkorn para caracterizar o índice de plasticidade das pastas. Os protótipos desenvolvidos e os estudos efetuados serviram de base para a análise da retração das várias pastas cerâmicas considerando diferentes curvas de cozedura.

A correlação entre a retração e o comportamento mecânico das diversas pastas usadas nesta investigação constitui um contributo relevante que permitirá a FA de elementos e estruturas cerâmicas com consumos elétricos controlados.

## **Palavras-chave**

Fabricação aditiva, ensaios mecânicos, argila, método de Pfefferkorn, cozedura.

# Abstract

Additive manufacturing (AM) is a common designation for the definition of three-dimensional printing processes of a physical model, in layers, from a three-dimensional digital model, resulting in a faithful physical representation that uses the exact amount of material during production - without waste and without the need to use other instruments or tools.

This dissertation is restricted to the exploration of AM by extrusion of ceramic pastes. The specificities of creating products by this process requires a thorough knowledge of ceramic materials, predicting and controlling their behaviour at all stages, namely during drying and firing.

The use of different ceramic pastes implied the need to explore appropriate solutions for the creation of architectural products, analysing different parameters and variables of the AM process.

This study places particular emphasis on the optimization of ceramic pastes for AM extrusion processes, using the Pfefferkorn method to characterize the optimal plasticity index of each of the tested pastes. The prototypes developed and the studies carried out served as a basis for analysing the shrinkage of the various ceramic pastes considering different firing curves.

The correlation between the shrinkage and the mechanical behaviour of the different pastes used in this investigation constitutes a relevant contribution that will allow the AF of elements and ceramic structures informed and adapted to a specific context.

## Keywords

Additive manufacturing, mechanical tests, clay, Pfefferkorn method, firing curves.

# Índice

Agradecimentos	III
Declaração de integridade	IV
Resumo	V
Abstract	VI
Lista de Siglas	IX
Lista de Figuras	X
Lista de Tabelas	XIII
<b>1. Introdução.</b>	<b>1</b>
1.1. Tema e problemática.	2
1.2. Objetivos e considerações gerais.	2
1.3. Organização da tese.	3
<b>2. Enquadramento.</b>	<b>5</b>
2.1. Técnicas da Fabricação Aditiva	5
2.2. Argila para a Fabricação Aditiva.	8
2.2.1. Aplicações.	8
2.2.2. Implicações.	17
2.2.3. Análises de extrusão e comportamento mecânico.	21
2.2.4. Elementos de ligação.	25
2.3. Argilas.	28
2.3.1. Grés.	30
2.3.2. Porcelana.	33
2.3.3. Refratária.	33

<b>3.</b>	<b>Metodologia para a caracterização das pastas.</b>	<b>35</b>
3.1.	Aplicação do método Pfefferkorn .	36
3.2.	Otimização da pasta cerâmica para a extrusão.	38
3.3.	Procedimento da Fabricação Aditiva.	42
3.3.1.	Caraterísticas dos provetes.	45
3.3.2.	Comportamento das pastas na Fabricação Aditiva.	46
3.4.	Pré-cozedura.	48
3.5.	Cozedura.	53
3.5.1.	Cozedura a 700°C.	56
3.5.2.	Cozedura a 900°C.	58
3.5.3.	Cozedura a 1050°C.	59
3.6.	Resultados.	61
3.6.1.	Análse visual.	61
3.6.2.	Análise da retração.	64
<b>4.</b>	<b>Ensaio mecânico.</b>	<b>67</b>
4.1.	Procedimento.	67
4.2.	Comportamento mecânico.	70
<b>5.</b>	<b>Conclusão</b>	<b>73</b>
5.1.	Considerações finais	73
5.2.	Trabalhos futuros	75
<b>6.</b>	<b>Bibliografia</b>	<b>76</b>
<b>7.</b>	<b>Anexos</b>	<b>79</b>

# Lista de siglas

ABS	Acrylonitrile Butadiene Styrene
ACLAB	Advanced Ceramics Research & Development Lab
AKF	Arburg Kunststoff Freiformen
AM	Additive Manufacturing
API	Application Programming Interface
ATD	Análise Térmica Diferencial
ATG	Análise Termo gravimétrica
CAD	Computer Aided Design
CAM	Computer Aided Manufacturing
CTE	Coefficient of Thermal Expansion
FA	Fabricação Aditiva
FFF	Fused Filament Fabrication
FDM	Fused Deposition Modelling
FRX	Fluorescência de Raio - X
ICDD	International Center of Diffraction Data
IDEGUI	Instituto de Design de Guimarães
IP	Índice de Plasticidade
LCT	Laboratório de Construção e Tecnologia
LEST	Laboratório de Estruturas
PA	Polyamide
PLA	Polylactic Acid
PMMA	Polimetilmetacrilato
PP	Polipropileno
STL	Stereolithography Format File
TPU	Thermoplastic Polyurethane
XRD	X-Ray Diffraction

# Lista de Figuras

## Capítulo 2 - Enquadramento

- 2.1. Wave Wall.  
[www.aclab-idegui.org/wave-wall](http://www.aclab-idegui.org/wave-wall)
- 2.2. Odin Wall.  
[www.aclab-idegui.org/odin-wal](http://www.aclab-idegui.org/odin-wal)
- 2.3. Hexashade.  
(a) arco Hexashade  
(b) estrutura de sombreamento  
[www.aclab-idegui.org/hexashade](http://www.aclab-idegui.org/hexashade)
- 2.4. V-Brick Wall.  
(a) elementos produzidos com pasta 130MP  
(b) elementos produzidos com pasta PRLF e PRNF.  
[www.aclab-idegui.org/v-brick-wall](http://www.aclab-idegui.org/v-brick-wall)
- 2.5. S-Brick Wall.  
(a) posição opaca  
(b) posição ventilada  
(c) posição ventilada condicionada  
[www.aclab-idegui.org/s-brick-wall](http://www.aclab-idegui.org/s-brick-wall)
- 2.6. Hive Wall.  
[www.aclab-idegui.org/hive-wall](http://www.aclab-idegui.org/hive-wall)
- 2.7. Kusudama Wall.  
[www.aclab-idegui.org/kusudama-wall](http://www.aclab-idegui.org/kusudama-wall)
- 2.8. Ficus Columns.  
[www.aclab-idegui.org/ficus-columns](http://www.aclab-idegui.org/ficus-columns)
- 2.9. Myriad and Radiator.  
[www.aclab-idegui.org/myriad-and-radiator](http://www.aclab-idegui.org/myriad-and-radiator)
- 2.10. Bloco V-Brick com deformação em fase de testes.
- 2.11. Elementos Hexashade.



- (a) consequências da retração do material cerâmico
- (b) solução sem a superfície interna
- 2.12. Elementos Kusudama Wall.
  - (a) celulose e amido
  - (b) celulose, amido e serrim
- 2.13. Ficus Column seccionada.
  - (a) ilustração com os desfasamento entre os pontos de contacto,
  - (b) coluna com a compensação nas zonas de contacto.
- 2.14. Provetes produzidos com a pasta 130MP e cozidos a 1260°C. A primeira coluna corresponde aos provetes com superfícies retas, a segunda com superfícies semi curvas e a terceira com uma supercie curva.
- 2.15. Provetes produzidos com a pasta 130MP e cozidos a 1260°C. vL - velocidade de deslocação, hL - altura da camada, p - pressão do ar comprimido.
- 2.16. Provetes produzidos com a pasta 130MP e cozidos a 1260°C para caraterização mecânica.
  - (a) provete sólido (Sol)
  - (b) provete tubular (T3)
  - (c) FA dos provetes solidos (Sol S, M, L)
  - (d) fornada com o total dos provetes.
- 2.17. Hybrid Clover.
 

[www.aclab-idegui.org/hybrid-clover](http://www.aclab-idegui.org/hybrid-clover)
- 2.18. Hybrid - Embedded.
 

[www.aclab-idegui.org/hybrid-embedded](http://www.aclab-idegui.org/hybrid-embedded)
- 2.19. Hybrid - Pin.
 

Ilustração da técnica usada para inserção do componente durante o FA, Sampaio et. Al, 2019.
- 2.20. Imagens captadas na visita à Fundação Castro Alves.
- 2.21. XRD da cerâmica cozida a 1260°C.
 

Picos identificados com: Q: quartzo e m: mulite.

### **Capítulo 3 - Metodologia para a caraterização das pastas**

- 3.1. Equipamentos usados para execução do método Pfefferkorn.
- 3.2. Provetes usados para aferir o melhor índice de plasticidade.
- 3.3. Comparação do IP entre as pastas utilizadas.
- 3.4. Equipamento Lutum®v4.3 MXL Clay Printer.
- 3.5. Exemplo do tipo de referência para cada um dos provetes

desenvolvidos.

- 3.6. As possibilidades para o trajeto de extrusão.
  - (a) espiral contínua
  - (b) pontos de inicio aleatórios
  - (c) pontos de inicio próximos
- 3.7. Ilustração com provetes de cada pasta na fase da FA.
- 3.8. Resultado de um processo pré-cozedura mal efetuado.
  - (a) provetes partidos após cozedura
  - (b) resíduos dos provetes
- 3.9. Registo e condicionamento.
  - (a) balança com o provete cru
  - (b) colocação dos provetes com auxilio de base em PMMA
  - (c) repouso antes de cura a temperatura ambiente
- 3.10. Série de provetes na estufa a 110°C.
- 3.11. Caixas de condicionamento dos provetes até os ensaios mecânicos.
- 3.12. Provetes inseridos no forno, preparados para o ciclo de cozedura.  
050
- 3.13. Curva de cozedura (1260°C).
- 3.14. Fases da cozedura das pastas cerâmicas.
- 3.15. Curva de cozedura (700°C).
- 3.16. Curva de cozedura (900°C).
- 3.17. Curva de cozedura (1050°C).
- 3.18. Composição das diferentes temperaturas por pasta.
- 3.19. Perceção visual da retração com provetes alinhados.
- 3.20. Conjunto total de provetes.

#### **Capítulo 4 - Ensaios mecânicos**

- 4.1. Equipamento para caracterização do comportamento mecânico.  
064
  - (a) Microtest® SCM3000, carga máxima de 50kN
  - (b) E8, carga máxima de 1800kN
- 4.2. Ilustrações dos provetes após rotura, colocados no equipamento E8 do LEST.
- 4.3. Gráfico com a comparação das pastas face à tensão e área dos provetes.
- 4.4. Gráficos correspondentes ao comportamento mecânico de cada pasta.

# Lista de Tabelas

## Capítulo 2 - Enquadramento

- 2.1. Percentagem de retração ( $\emptyset$ ) após cozedura a 1260°C. Valor médio dos ensaios à compressão  $\sigma$  (MPa).
- 2.2. Análise química quantitativa por FRX (% em peso) da amostra.
- 2.3. Características das pastas definidas pelo fabricante.

## Capítulo 3 - Metodologia para a caracterização das pastas

- 3.1. Tabela para inserção dos valores recolhidos através do método Pfefferkorn.
- 3.2. Tabela para obter valor da quantidade de água a adicionar em função da quantidade de pasta Grés 130MP a usar.
- 3.3. Valores do método Pfefferkorn, preparação da pasta e validação através do método Pfefferkorn.
- 3.4. Tabela com os parâmetros para o desenvolvimento dos provetes.
- 3.5. Registo e condicionamento no espaço temporal.
- 3.6. Relação entre tempo e temperatura (1260°C).
- 3.7. Ação aberto ou fechado para porta e chaminé (1260°C).
- 3.8. Relação entre tempo e temperatura (700°C).
- 3.9. Ação aberto ou fechado para porta e chaminé (700°C).
- 3.10. Relação entre tempo e temperatura (900°C).
- 3.11. Ação aberto ou fechado para porta e chaminé (900°C).
- 3.12. Relação entre tempo e temperatura (1050°C).
- 3.13. Ação aberto ou fechado para porta e chaminé (1050°C).
- 3.14. Análise da retração do provete, em altura, desde o modelo digital até à cozedura máxima de 1050°C.
- 3.15. Análise da retração do diâmetro do provete, desde o modelo digital até à cozedura máxima de 1050°C.

- 3.16. Análise da retração da espessura do provete, desde o modelo digital até à cozedura máxima de 1050°C.

#### **Capítulo 4 - Ensaio mecânicos**

- 4.1. Média dos resultados sobre o comportamento mecânico de cada material cerâmico.

# 1.

## Introdução

A plasticidade das pastas cerâmicas é um dos fatores que mais condiciona os processos de FA por extrusão, sendo normalmente padronizada pelo método de Pfefferkorn (Toretti, et al, 2012).

A FA por extrusão é essencialmente controlada pela velocidade de extrusão, pelo diâmetro do extrusor e pela altura das camadas (Cruz et al., 2017).

A presente investigação desenvolve-se no contexto de trabalhos do Advanced Ceramics R&D Lab (ACLab), um laboratório que desde 2016 tem desenvolvido projetos no âmbito de FA cerâmica de componentes arquitetónicos. Destacam-se o desenvolvimento de metodologias para o desenho e produção de elementos construtivos personalizáveis para superfícies de cobertura abobadas (Carvalho, 2018) e de colunas com geometrias complexas (Moreira, 2018). No caso das colunas assumiu especial importância o controlo e compensação da retração. Investiga ainda o desenvolvimento de materiais compósitos de base cerâmica, nomeadamente pela adição de celulose para maior controlo de efeitos de fissuração induzidos pela retração de peças finas (Campos, 2019).

A caracterização do comportamento mecânico de provetes, produzidos por extrusão manual e FA, tem sido objeto de especial atenção no ACLab para determinar a preponderância da geometria, dimensão e espessura dos provetes no seu comportamento em ensaios de compressão e de flexão em três pontos (Cruz et al., 2019).

O conhecimento do comportamento mecânico influenciado pela temperatura aplicada, abrirá portas à otimização do procedimento de cozedura adequado às características mecânicas pretendidas.

## 1.1.

# Tema e problemática

A presente investigação visa contribuir para o aprofundamento do conhecimento relativo às características ideais de uma pasta cerâmica para processos de FA por extrusão, bem como de prever as propriedades dos produtos desenvolvidos por esse processo. Atualmente, verifica-se uma crescente integração de processos da FA para a produção rápida e econômica de modelos, protótipos e elementos de construção complexos, podendo ser aplicados para produção em massa, ou para elementos individualizados específicos (Hauschild e Karzel, 2018).

Na manufatura de produtos cerâmicos, a cozedura representa um significativo consumo energético. Se considerarmos os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, propostos pela ONU<sup>1</sup>, a atingir no horizonte de 2030, é relevante um ajuste das curvas de cozedura utilizadas na indústria cerâmica, tendo em consideração os limites das temperaturas máximas necessárias para os requisitos exigidos para o desenvolvimento de cada peça.

## 1.2.

# Objetivos e considerações gerais

A possibilidade de aprofundar as competências adquiridas nos últimos sete anos nos trabalhos efetuados enquanto técnico do Laboratório de Construção e Tecnologia (entre 2012 e 2013) e no Instituto de Design de Guimarães (desde 2013) e no Advanced Ceramics R&D Lab (desde 2016), constitui a principal motivação do trabalho que pretendo desenvolver na dissertação de Mestrado em Engenharia do Produto.

Assim sendo, pretende-se investigar a influência da constituição e preparação de pastas cerâmicas na qualidade dos processos de extrusão e nas propriedades mecânicas do material extrudido assim como aferir os resultados

1. No dia 25 de setembro de 2015 foram definidos os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável pela ONU. Os objetivos e metas traçadas, servem como estímulo a ações em áreas de importância crítica para a humanidade e o planeta.

finais do comportamento mecânico com cozeduras a diferentes temperaturas.

Pré-dimensionar a alteração das características volumétricas dos modelos ao longo das várias fases de estabilização, até a cozedura, de acordo com os índices de retração que o material cerâmico apresenta.

Inferir a possibilidade de redução da quantidade de energia (temperatura) necessária para processos de cozedura, correlacionando os limites mecânicos necessários para os diferentes modelos para o desenvolvimento de um produto.

## **1.3.**

# Organização da tese

O documento divide-se ao longo de sete capítulos, com início no capítulo introdutório – 1. Introdução – onde expõe o contexto da presente investigação com breve descrição da temática do estudo – 1.1. Tema e problemática – e objetivos delineados para o seu desenvolvimento – 1.2. Objetivos e considerações gerais –.

O segundo capítulo – 2. Enquadramento – reúne as várias temáticas presentes na investigação, iniciando uma breve descrição das técnicas da FA por deposição de material, mais próximas á utilizada no presente estudo (2.1. Técnicas da Fabricação Aditiva). São sintetizadas as várias aplicações desenvolvidas no ACLab e implicações inerentes ao seu desenvolvimento (2.2. Argila para a Fabricação Aditiva). Encerra-se o capítulo com referência às argilas envolvidas no estudo (2.3. Argilas).

O terceiro capítulo – 3. Metodologia para a caracterização das pastas cerâmicas – documenta todo o procedimento para o tratamento das pastas cerâmicas, desde a aferição do índice de plasticidade (3.1. Aplicação do método Pfefferkorn) até a sua otimização para o processo de extrusão (3.2. Otimização da pasta para a qualidade de extrusão). De seguida, são documentadas as características dos provetes e o comportamento das argilas durante o FA (3.3. Procedimento da Fabricação Aditiva), as várias etapas de

tratamento de secagem, cura (3.4. Processo pré-cozedura) e cozedura dos provetes para as diferentes temperaturas (3.5. Cozedura). Este capítulo finaliza com a análise visual e análise da retração dos provetes desenvolvidos para cada material cerâmico (3.6. Resultados).

O quarto capítulo – 4. Ensaio mecânico – resume todo o procedimento de ensaio (4.1. Procedimento) e respetiva análise dos resultados obtidos (4.2. Comportamento Mecânico).

O quinto capítulo – 5. Conclusão – dedica-se à exposição das conclusões referentes a esta investigação e possíveis indicações para trabalhos futuros (5.1. Trabalhos futuros).

O sexto capítulo – 6. Bibliografia – dá a conhecer a bibliografia utilizada para o desenvolvimento do presente estudo.

O sétimo capítulo – 7. Anexos – contém os anexos mais pertinentes para justificar resultados e conclusões apresentadas no conteúdo do documento.



# 2.

## Enquadramento

O presente capítulo contextualiza a investigação no âmbito da FA, métodos de classificação do índice de plasticidade, enumeração e descrição das pastas viscosas resumindo as aplicações desenvolvidas no ACLab com recurso à técnica da FA.

Os estudos apresentados, exploram a implementação das matérias viscosas no desenvolvimento de estruturas arquitetónicas para revestimento de fachadas, sistemas de sombreamento, paredes modulares entre outras. São identificadas implicações provenientes das matérias utilizadas, o que leva à necessidade de as caracterizar ao nível da retração e conseqüente deformação, assim como o comportamento mecânico cozidas a diferentes temperaturas. Os ensaios realizados, definiram o tipo de provetes a criar para a caracterização mecânica de cada pasta, possibilitando a comparação entre os resultados obtidos dos já estudados com os das diferentes matérias argilosas. A técnica de produção utilizada com a exploração das diferentes pastas viscosas, abre horizontes para a aplicação de modelos personalizados e feitos à medida nas mais diversas áreas.

### 2.1.

## Técnicas da Fabricação Aditiva

As técnicas de FA utilizam ficheiros informáticos que descrevem modelos digitais (bidimensionais ou tridimensionais), desenvolvidos em programas Computer-Aided Design (CAD) de acordo com a técnica de fabrico específica. O formato de leitura mais utilizado é o Stereolithography (STL), utilizado pelas diversas técnicas de prototipagem rápida (Wong, 2012), posteriormente convertidos em ficheiros G-Code produzidos por programas CAD-CAM.

O acrónimo 3D Printing (3DP) remete para um grupo de tecnologias da FA que pela sucessiva sobreposição de camadas geralmente subdivididas em dois processos, Binding e Deposition. O processo Binding, refere-se a técnicas em que ocorre a fusão do material espalhado camada a camada, em toda a área de impressão, antes da passagem do material ligante, usando o material em excesso como suporte. A este processo pertencem as técnicas SLA (Stereolithography), SLS (Selective Laser Sintering), 3DP (3D Printing) e LOM (Laminated Object Manufacturing). O processo Deposition representa as técnicas de extrusão de material através de uma ponta extrusora sobre uma plataforma plana camada a camada. Quanto mais complexo for o modelo, maior é a probabilidade de utilização de estruturas de suporte adicional. A este processo atribui-se as técnicas FDM (Fused Deposition Modeling), FFF (Fused Filament Fabrication), Paste Extrusion e Polyjet (Warnier, 2014).

As técnicas Arburg Plastic Freeforming (AKF) e Liquid Deposition Modeling (LDM) comparam-se às anteriores definidas como processos de deposição (Rtter, 2018). No contexto desta investigação importa descrever em maior profundidade três técnicas de FA semelhantes à utilizada no presente estudo. Os componentes e variáveis comuns entre os processos de AM, FDM, AKF e LDM, tais como, ponta extrusora, fuso extrusor e o mecanismo de extrusão condicionam de igual forma a deposição do material camada a camada contribuindo para a qualidade final do modelo.

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

Caracteriza-se pela deposição camada a camada sobre uma plataforma e posterior fundição do material. O processo de FDM inicia-se com o aquecimento de filamento termoplástico, pressionado contra a ponta extrusora aquecida através de um servomotor com velocidade de extrusão definida em função do fluxo pretendido. Ao contrário da técnica LDM, a alteração do material para o estado sólido é mais rápida, permitindo assim, o desenvolvimento de paredes com mais declive. A estrutura de suporte, quando necessária, pode ser criada por uma segunda ponta extrusora, possibilitando o uso de outro material polimérico, mas também pela própria diferenciando apenas a densidade da estrutura o que permitirá a sua posterior remoção. A tecnologia FDM é inicialmente desenvolvida por Scott Crump, no início da década de 1990, e comercializa pela Stratasys, detentora da patente. O termo Fused Filament Fabrication abreviação FFF apareceu como alternativa adotada pela RepRap (Warnier,2014).

### **AKF (Arburg Plastic Freeforming)**

O acrónimo AKF abrevia a designação alemã Arburg Kunststoff Freiformen. É patenteada pela empresa ARBURG produtora de equipamentos de moldagem por injeção para os diversos setores industriais. Esta técnica começou a ser idealizada desde 2004 iniciando o desenvolvimento das versões beta em 2007 com o objetivo principal de apoiar as técnicas de fabrico por injeção e diminuir custos na produção de baixa escala (Kessling, 2014).

O processo de AKF enquadra-se em processos de FA pela construção de peças camada a camada que utilizam consumíveis em granulado, à semelhança dos equipamentos de moldagem por injeção. O consumível é depositado num recipiente, que se desloca ao longo de um cilindro aquecido, com o auxílio de um fuso, para o compartimento de injeção com uma pressão até 500 bar, criando pequenas partículas com diâmetro variável entre 0,08 e 0,3 milímetros. O equipamento pode ser composto por dois compartimentos estacionários com plataforma controlada por movimentos entre os eixos x,y,z, possibilitando a combinação de materiais com características distintas. Os materiais mais utilizados por esta técnica são os poliméricos Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS), Thermoplastic Polyurethane (TPU), Polyamide (PA) e Polycarbonate (PC).

### **LDM (Liquid Deposition Modeling)**

A terminologia LDM (Liquid Deposition Modeling), usada para descrever os processos de FA cerâmica implementados no Advanced Ceramics R&D Lab, representa uma técnica semelhante à Paste Extrusion (Warnier,2004). A nomenclatura LDM foi adotada pelo fabricante italiano Delta 3D Wasp produtor de impressoras 3D (Rosenthal,2017). O processo de fabrico necessita essencialmente de um reservatório da pasta viscosa, ar comprimido e o fuso inserido na estrutura que suporta a ponta extrusora. A qualidade de extrusão pode ser controlada à semelhança das técnicas anteriormente descritas, ajustando a cada caso as variáveis altura da camada, a largura da ponta extrusora, a velocidade de deslocação, a velocidade de rotação do fuso e a pressão. Esta técnica tem um conjunto de restrições formais dada a natureza viscosa do material, mais suscetível ao colapso das suas paredes, ao contrário de modelos produzidos em material polimérico.

## 2.2.

# Argila para a Fabricação Aditiva

O Advanced Ceramics R&D Lab, tem vindo a desenvolver protótipos através do FA com a técnica LDM. O grés é a matéria mais testada para a prototipagem de componentes arquitetónicos. Pela necessidade de melhorar o comportamento da pasta cerâmica, sobretudo durante o seu estado viscoso, foram testados compósitos resultantes de misturas com diferentes percentagens de grés, celulose e serrim, testados no contexto da Kusudama Wall (Campos,2019).

### 2.2.1.

#### Aplicações

O presente subcapítulo menciona as aplicações desenvolvidas no ACLab desde 2016, ano em que foi criado o primeiro protótipo cerâmico. Foram utilizados vários equipamentos para a concretização dos projetos, desde os de preparação da pasta, tratamento térmico pré e pós cozedura, FA para materiais poliméricos, cerâmicos e compósitos.

#### **Wave Wall**

O primeiro protótipo desenvolvido no ACLab foi a Wave Wall (FIG.2.1.). O seu desenho é gerado a partir de um modelo computacional que propõe um sistema de revestimento de fachadas composto por blocos cerâmicos ondulados. Todos os blocos são compostos por uma estrutura interna hexagonal e uma geometria externa orgânica, tem a especificidade de explorar formalmente o grau máximo de curvatura vertical através da extrusão da matéria viscosa sem colapsar. A parede tem a particularidade de ser composta por elementos geometricamente distintos.

O modelo computacional teve um papel fundamental para em dois dos momentos do processo de conceção da parede: (1) a definição da geometria global da parede, da sua decomposição em blocos, da sua geometria interna, e finalmente, (2) a criação do código numérico traduzindo a geometria de

cada componente em linguagem G-Code de acordo com as características do processo de FA pré-definido (Carvalho, 2018).

O material usado para a produção da Wave Wall foi a pasta Grés 130MP devidamente preparada com o objetivo de obter uma fluidez ótima durante o processo de fabrico.



**FIG 2.1.** Wave Wall ([www.aclab-idegui.org/wave-wall](http://www.aclab-idegui.org/wave-wall))

### **Odin Wall**

A Odin Wall explora o potencial de associar a modelação computacional à FA para o desenvolvimento de componentes cerâmicos de formas livres. À semelhança da Wave Wall, foi também concebida com uma geometria externa irregular, mas com uma estrutura interna ondulada (FIG.2.2.). O protótipo completo foi produzido a uma escala reduzida constituída por duas paredes com três milímetros de espessura cada uma. Foram prototipados dois componentes à escala real com estrutura interna formada por quatro

paredes e uma superfície externa. Neste modelo, é de salientar a importância da composição da pasta, capaz de suportar o grau de inclinação aplicado, uma vez que as superfícies são definidas apenas por uma parede horizontal restringindo altura da layer aplicada.



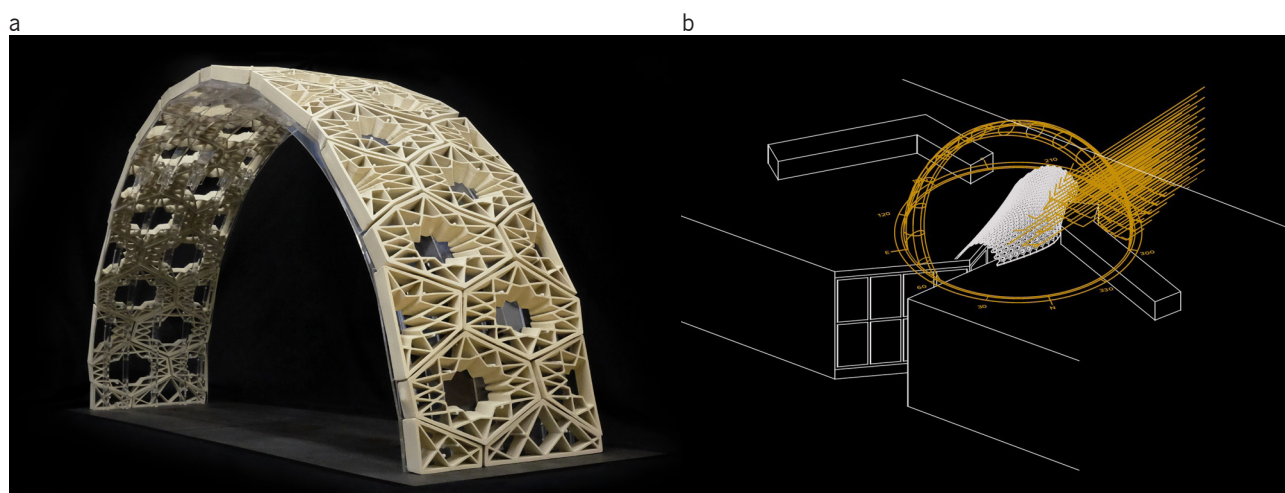
**FIG. 2.2.** Odin Wall ([www.aclab-idegui.org/odin-wall](http://www.aclab-idegui.org/odin-wall))

## Hexashade

O protótipo Hexashade explora a utilização de blocos cerâmicos hexagonais vazados com o intuito de auxiliar ao controle de sombreamento de fachadas em períodos de maior exposição solar (FIG.2.3.). A estrutura interna e a geometria global são definidas de acordo com o local a implementar e respetiva incidência solar. Cada componente é constituído por uma forma interna, com o cruzamento dos pontos médios e máximos dos segmentos de reta que delimitam a superfície interna e exterior do bloco (Carvalho,2018). Para a prototipagem por FA, definiu-se para a geometria interna uma parede vertical e duas para a superfície envolvente. O protótipo realizado no contexto deste projeto teve como pretexto desenvolver uma estrutura de sombreamento para



um pátio adjacente ao ACLab no Instituto de Design de Guimarães (IDEGUI), recorrendo às tecnologia e equipamento de FA existentes nas instalações.



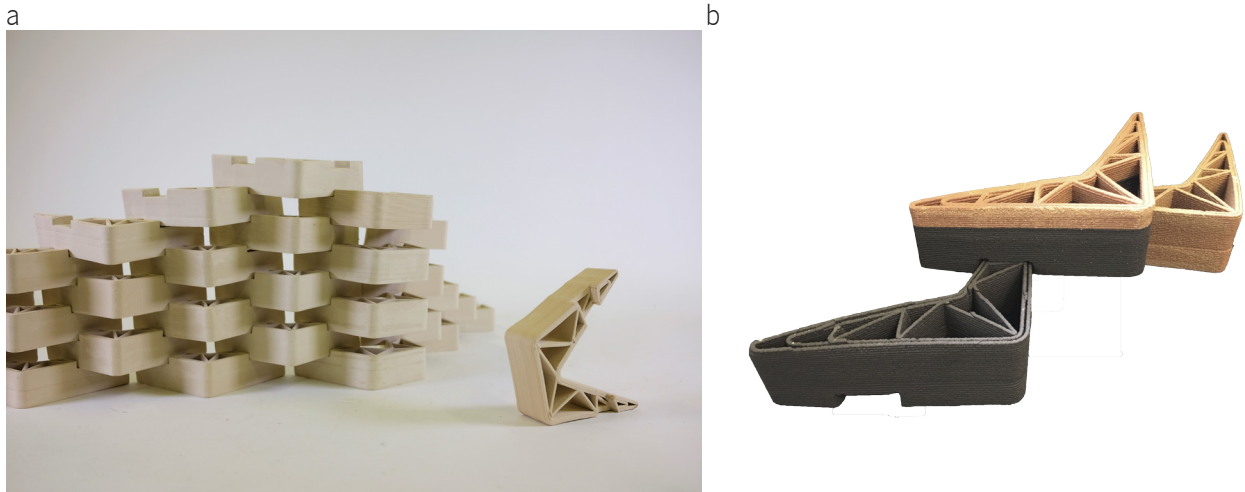
**FIG. 2.3.** Hexashade ([www.aclab-idegui.org/hexashade](http://www.aclab-idegui.org/hexashade))

(a) arco Hexashade; (b) estrutura de sombreamento;

### V-Brick Wall

A V-Brick Wall resulta de uma exploração formal de projeto desenvolvida com o auxílio do Grasshopper® — uma Application Programming Interface (API) do programa CAD de modelação 3D, Rhinoceros® —, que explora o desenho e fabrico de paredes autoportantes constituídas por blocos cerâmicos produzidos por FA. (Cruz, 2019). De modo a exemplificar o potencial da sua aplicação, foi proposto o Hexagon Pavilion, um pavilhão constituído por 4 espaços hexagonais contíguos, cujos paramentos são constituídos por dois tipos de blocos V-Brick. A partir da geometria de um dos blocos, é possível a montagem de paredes lineares relacionados entre si, permitindo a ligação com o segundo bloco geometricamente diferente para aplicar uma rotação de 60° ao alinhamento da parede (FIG.2.4.).

Ao longo da investigação foram propostas diferentes versões dos blocos, visando a do seu comportamento ao nível da retração e conseqüente deformação. A versão final mantém uma configuração global em forma de V, com dois entalhes para ligação entre peças, articuladas através de uma estrutura interna em “treliça” e uma superfície envolvente com duas paredes. De modo a testar a textura e cor de outras pastas cerâmicas, alguns dos blocos foram realizados com argila refratária PRLF e PRNF para além da já aplicada noutros protótipos o Grés 130MP.



**FIG. 2.4.** V-Brick Wall ([www.aclab-idegui.org/v-brick-wall](http://www.aclab-idegui.org/v-brick-wall))

(a) elementos produzidos com pasta 130MP; (b) elementos produzidos com pasta PRLF e PRNF;

### S-Brick Wall

O conceito usado para o desenvolvimento deste modelo, permite a montagem de uma parede de diferentes formas. A S-Brick Wall, pode assim, se caracterizar por ser opaca ou ventilada, sendo que na segunda opção (b), existe a possibilidade de condicionar a ventilação devido à sua geometria interna ou ainda numa parede ventilada mais ampla (FIG.2.5.). A parede é construída apenas com recurso a um tipo de modelo com geometria interna em S de uma só parede e uma superfície externa ondulada permitindo uma conexão fácil entre as diferentes camadas de tijolos.



**FIG. 2.5.** S-Brick Wall ([www.aclab-idegui.org/s-brick-wall](http://www.aclab-idegui.org/s-brick-wall))

(a) posição opaca; (b) posição ventilada; (c) posição ventilada condicionada;



## Hive Wall

É aplicado na Hive Wall, a modelação paramétrica e a FA, com o intuito de desenvolver um sistema arquitetónico de revestimento para ventilação e sombreamento de fachadas a partir de componentes cerâmicos personalizados. Mais uma vez, à semelhança dos modelos anteriores, este pode também ser adaptado às necessidades do local de implementação, adaptando a geometria interna e externa de cada elemento cerâmico.

O desenho dos tijolos caracteriza-se pela utilização de três pirâmides não uniformes unidas pela interseção da camada duplicando, nesse ponto, a espessura da parede, oferecendo assim, uma montagem facilitada para um sistema estável de conexão e encaixe. No total, o protótipo é composto por 54 tijolos de 100mm de profundidade com uma área aproximada de um metro quadrado (FIG.2.6.).

No processo de fabrico, utilizou-se o equipamento Lutum@v4.3 MXL Clay Printer da VormVrij, com a ponta extrusora de 5mm de diâmetro, configurada para deposição de camadas a uma altura de 1,5mm e uma pressão variável entre os 4 e 4,5 bars. A superfície tem apenas uma parede, sendo que, devido à largura da camada e do tipo de estrutura aplicada, não expõe fragilidades de deformação e de resistência na montagem total da parede.

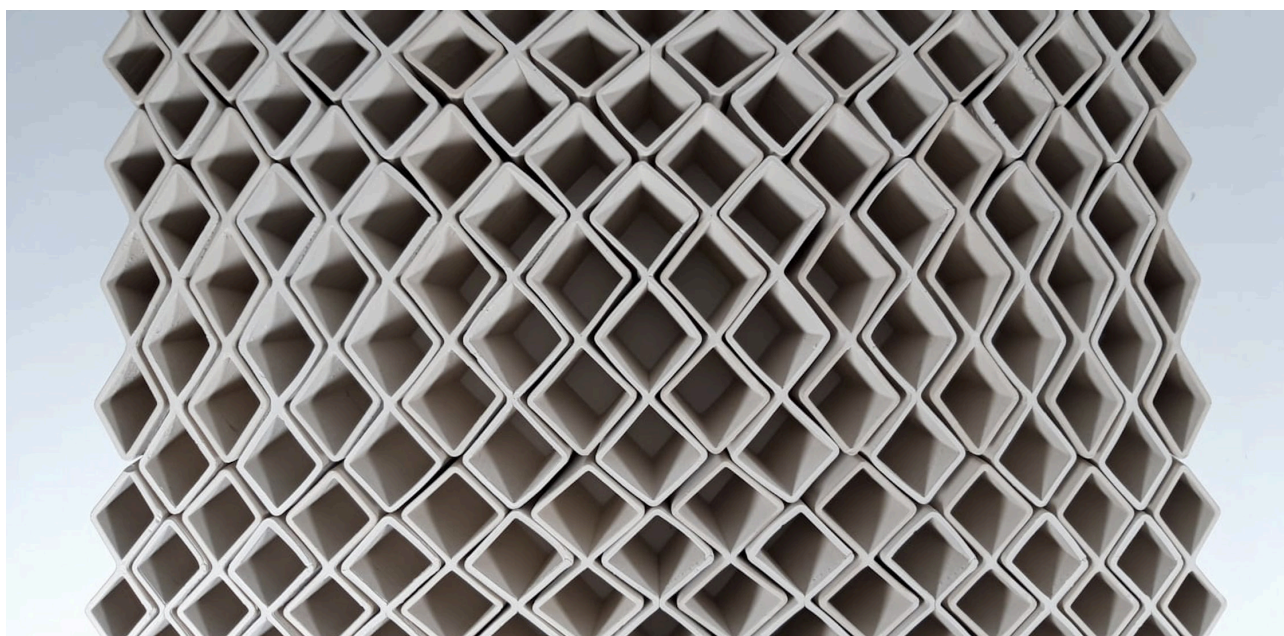


FIG. 2.6. Hive Wall ([www.aclab-idegui.org/hive-wall](http://www.aclab-idegui.org/hive-wall))

## Kusudama Wall

O Kusudama Wall consiste num modelo computacional e protótipo desenvolvido com recurso à FA. Propõe um sistema de revestimento de fachadas, semelhante aos conceitos anteriormente referidos, diferenciando-se não só pela geometria, mas também pelos materiais usados.

Os elementos arquitetónicos hexagonais variam na sua forma interna de duas maneiras, a primeira numa abertura triangular e a segunda numa abertura pentagonal (FIG.2.7.). A superfície interna, seja triangular ou pentagonal, é composta por duas paredes de 3mm de espessura cada uma, unindo-se com a externa no topo do bloco. A consistência da forma é garantida com a introdução de estrias nos espaços existentes entre as duas superfícies.

O modelo paramétrico consiste na agregação de blocos concebidos com pasta de celulose, amido, serrim e pasta cerâmica. A parede é seccionada pelas misturas celulose e amido, celulose e serrim e celulose e argila.

Conclui-se que as fibras atenuam possíveis deformações e fissurações nas zonas mais frágeis, diminuindo o peso bruto da peça e aumentando a sua capacidade de resistência (Campos,2019).



**FIG. 2.7.** Kusudama Wall ([www.aclab-idegui.org/kusudama-wall](http://www.aclab-idegui.org/kusudama-wall))



## Ficus Columns

A Ficus Columns, é um projeto de investigação desenvolvido no ACLab, no âmbito da tese Fabrico Aditivo Cerâmico em Arquitetura: Metodologia Computacional para Definição de um Sistema de Coluna de João Moreira, focado no desenvolvimento de um sistema de componentes estruturais reticulados, customizados e otimizados, indo ao encontro das características geométricas da natureza (FIG.2.8.).

O design da coluna, dependendo das suas subposições e características do material proposto, é definido através de um conjunto de etapas iniciadas por uma forma base, divisão da forma, definição de padrões, aplicação recursiva, suavização do padrão, variação e rotação da secção.

O protótipo foi desenvolvido a várias escalas, inicialmente a 1:5 e posteriormente a 1:2. No primeiro caso, a coluna foi produzida de uma só vez ao contrário da segunda escala que foi dividida em 3 partes.

As superfícies tubulares produzidas com a pasta Grés 130MP através da FA, são compostas por uma parede com 3mm de espessura à escala 1:5 e 5mm à escala 1:2, sendo que em ambos os casos a altura da camada é de 1,5mm.



FIG. 2.8. Ficus Columns ([www.aclab-idegui.org/ficus-columns](http://www.aclab-idegui.org/ficus-columns))

## Myriad and Radiator

Com patente registada em agosto de 2019, a Myriad consiste numa parede cortina composta por elementos cerâmicos tubulares em cerâmica preenchida com cimento de alto desempenho oferecendo resistência estrutural. A modularidade criada apenas com recurso a duas peças distintas permite uma personalização à escolha do utilizador. A junção entre as peças é facilitada devido geometria idêntica nas extremidades dos perfis tubulares, sendo que, uma das peças é composta por três pontos de ligação (Y) e outra com dois (I).

Seguindo o mesmo sistema de montagem, a Myriad pode definir-se como um kit radiador para a circulação de fluidos aditivos. A aplicação de mais um elemento cerâmico terminal permite encerrar as extremidades com o intuito de controlar os trajetos de fluidez ao longo da estrutura igualmente personalizável.

O tom negro visível na superfície, como se pode observar na figura 2.9., é um vidrado aplicado numa segunda cozedura em todas as peças após tratamento térmico até a chacota do Grés 130MP. Devido ao processo utilizado, FA, é perceptível a dificuldade de impregnação do vidrado na superfície entre as uniões das camadas com altura de 1.5mm.

As peças foram desenvolvidas apenas com uma parede de 3mm de espessura para uma altura total de 200mm.



FIG. 2.9. Myriad and Radiator ([www.aclab-idegui.org/myriad-and-radiator](http://www.aclab-idegui.org/myriad-and-radiator))

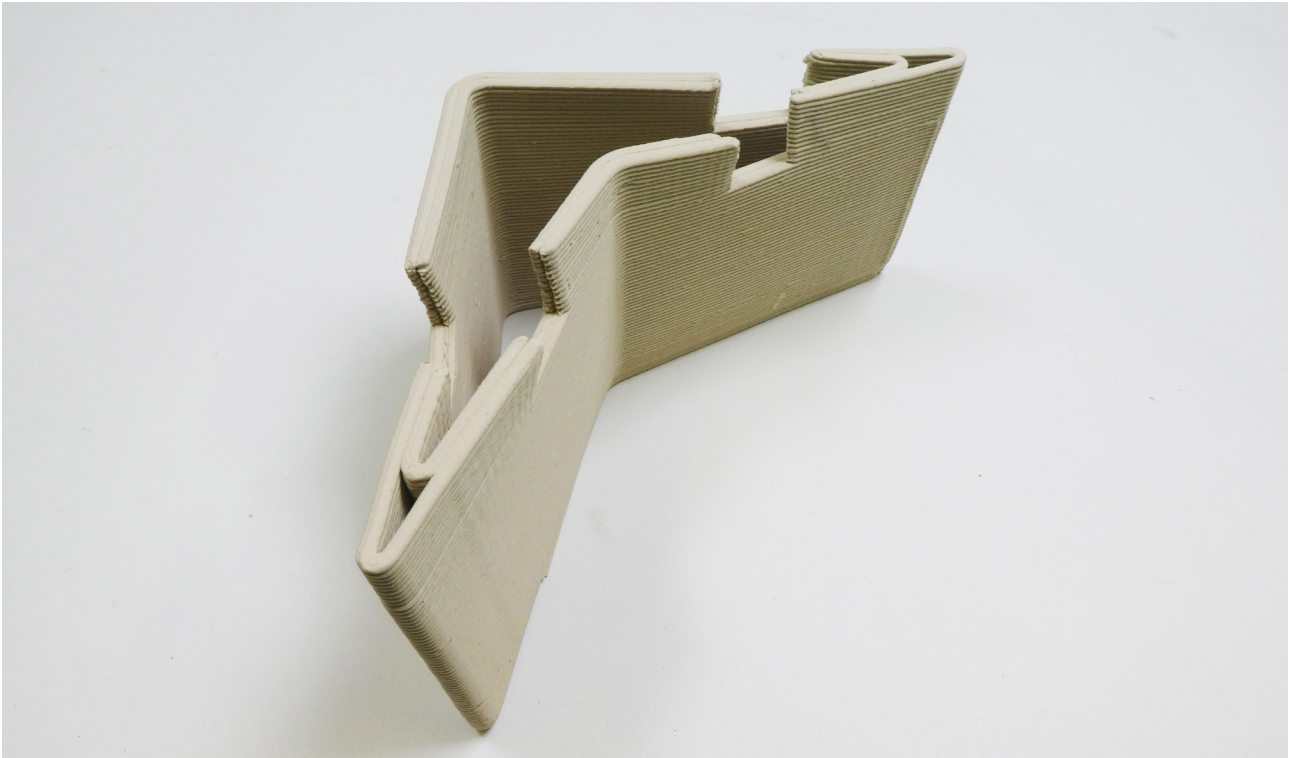
### **2.2.2.** Implicações

No decorrer dos projetos executados no ACLab, foram registados vários acontecimentos relacionados com o comportamento das matérias viscosas no momento após o processo de FA. A retração, deformação e o ângulo máximo admissível das superfícies verticais são os principais desafios na FA em cerâmica.

Na FA, o material polimérico e metálico fundem-se logo após o ato de extrusão. A aplicação de calor, permite o controlo da transição vítrea e de fusão. Em contraste, o material cerâmico tem um ponto de fusão muito alto tornando este um dos desafios mais críticos na FA (Lee, 2017).

Durante as várias fases de secagem da matéria argilosa, a percentagem de retração pode ser relevante dependendo da forma geométrica criada. No capítulo anterior, estão mencionadas ações que foram aplicadas para atenuar as deformações inerentes às características do elemento cerâmico e matéria usada. Uma das medidas propostas, foi a criação de estruturas internas padronizadas envolvidas pela superfície externa do modelo com o intuito de controlar as forças exercidas durante a secagem.

Um protótipo inicial dos blocos V-Brick, constituído apenas por uma parede com espessura de 3mm e altura da camada de 1,5mm sem estrutura interna, verificou-se uma deformação das suas paredes resultantes de movimentos com mudanças de direção do bico de extrusão nas extremidades das peças. Estes movimentos associados à viscosidade da pasta e falta de apoio vertical das camadas, resultou na deformação das paredes e consequente alteração da geometria pretendida como se pode observar na figura 2.10.

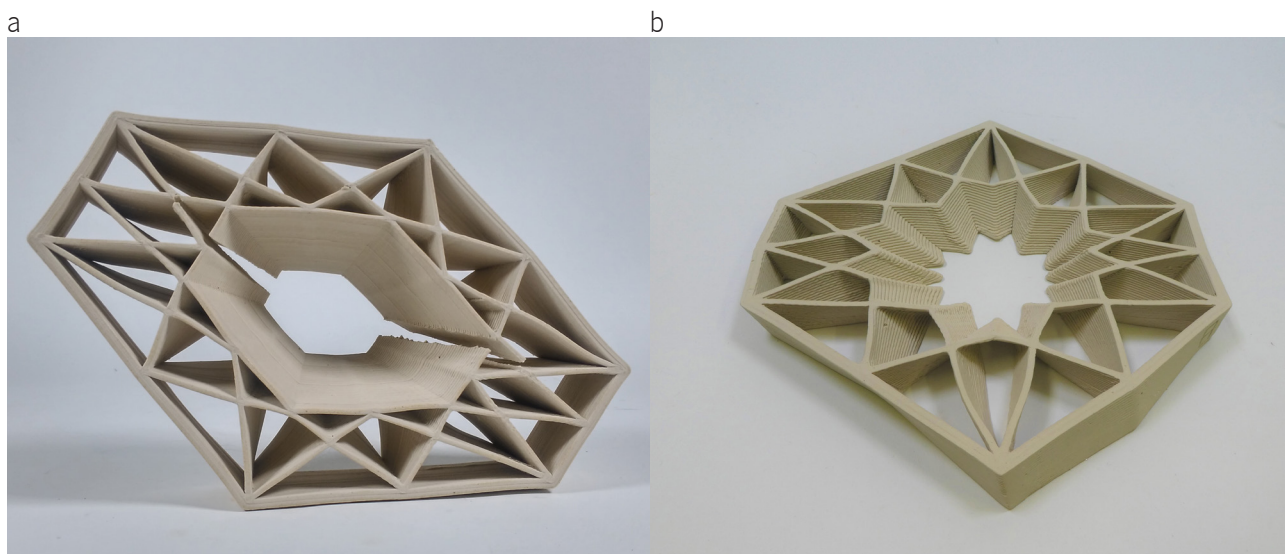


**FIG. 2.10.** Bloco V-Brick com deformação em fase de testes.

No entanto, Tatiana Campos na sua dissertação de mestrado, refere que, a deformação existente nas superfícies do bloco Alveolus, provocada pela retração do material, põe em causa as ligações entre as diferentes camadas ou superfícies em especial nas juntas e uniões dos módulos. Este acontecimento dá-se no processo de secagem para os diferentes tipos de mistura.

Na figura 2.11., podemos identificar uma rotura entre o cruzamento de superfícies pertencentes à estrutura interna e externa do bloco à escala real pertencente ao projeto Hexashade. Ainda como protótipo inicial de teste, percebe-se que, as forças exercidas durante a retração do material, principalmente a superfície interior que limita o volume, dão origem a fissuras obrigando a um ajuste de geometria com o intuito de colmatar estes entraves. Inicialmente, mantendo a forma interna, adicionou-se mais uma parede à já existente, sem o resultado desejado, com as quebras a fazerem-se representar nos pontos críticos durante o processo de cura. A solução passou por retirar a superfície interna do volume, substituída pela estrutura de suporte do bloco, mantendo a função de controlo de sombreamento que lhe era conferida como podemos verificar na figura 2.11. Uma das hipóteses para melhoria do comportamento da pasta cerâmica neste tipo de situações, poderá passar pela integração de aditivos químicos na sua composição, garantindo uma

boa plasticidade para extrusão apesar da diminuição da quantidade de água. Uma segunda hipótese, passa pela adição de fibras de modo a aumentar a resistência das suas superfícies (Carvalho, 2018).



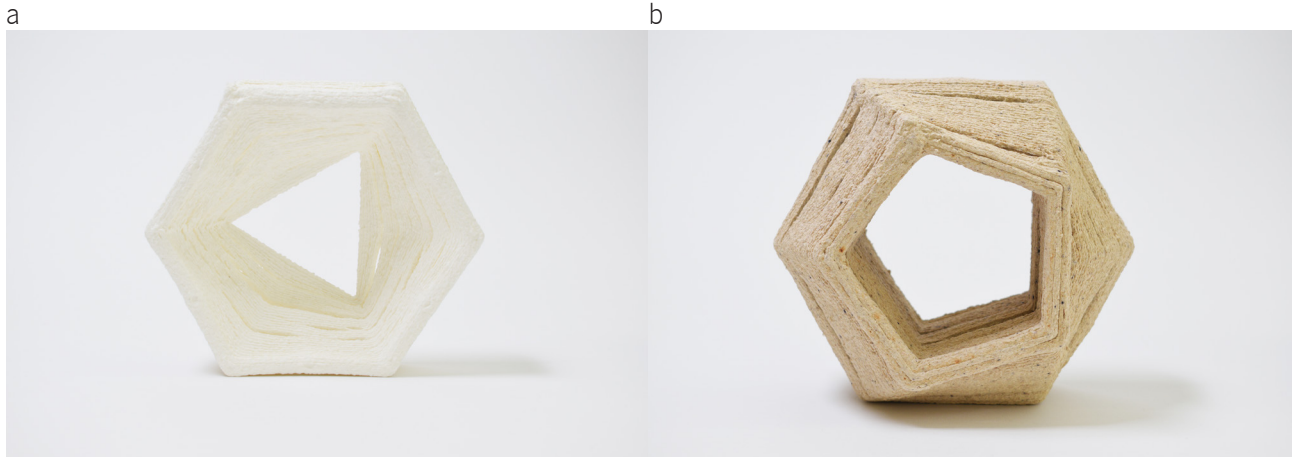
**FIG. 2.11.** Elementos Hexashade

(a) consequências da retração do material cerâmico; (b) solução sem a superfície interna;

A mistura de celulose com argila apresentou uma solução positiva relativamente ao comportamento das peças cerâmicas durante a secagem e cozedura a altas temperaturas. Esta mistura teve o melhor desempenho no que diz respeito à retração e consistência da pasta. No entanto, Tatiana Campos refere que, a celulose atenua os fatores de deformação, mas não elimina a retração diferenciando-se ainda assim nas misturas à base de celulose das de mistura à base de celulose e argila.

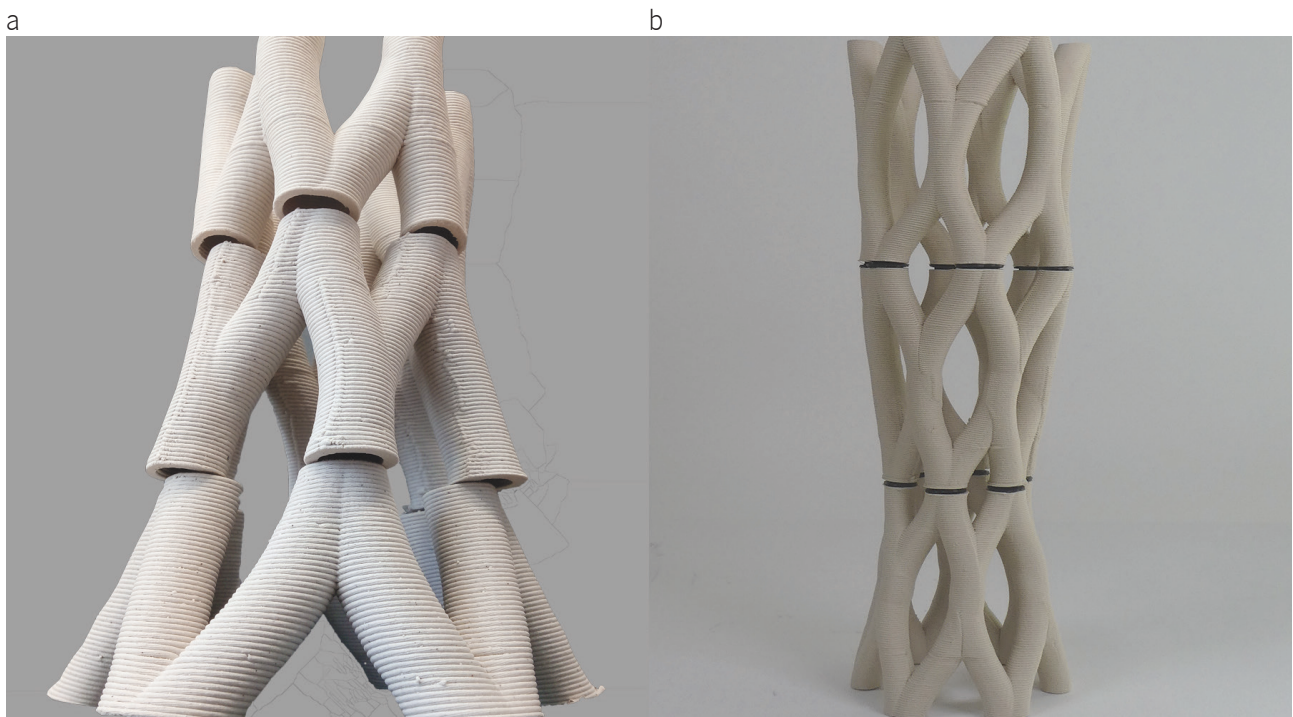
Na figura 2.12., é notória a separação das camadas por laminação dos elementos produzidos com - celulose e amido - e - celulose, amido e serrim - no momento da secagem com a consequente diminuição do volume devido à retração da mistura. Apesar das análises menos favoráveis, é de salientar as texturas resultantes, potenciando o interesse na sua utilização em contextos específicos.





**FIG. 2.12.** Elementos Kusudama Wall  
(a) celulose e amido; (b) celulose, amido e serrim;

No protótipo Ficus Columns prevalece a problemática das ligações entre as várias peças da coluna onde se acentua o efeito da retração relativamente aos protótipos anteriores, sobretudo com o aumento da escala dos modelos. A complexidade do modelo, constituído por uma estrutura tubular e vários pontos de apoio sobre a mesa de extrusão, como mostra a figura 2.13., dificulta a perceção do comportamento de retração e deformação após o processo de secagem e cozedura, solucionado, após vários testes com a compensação estratégica nos topos das peças seccionadas definida no modelo digital (Moreira, 2019).



**FIG. 2.13.** Ficus Column seccionada  
(a) ilustração com os desfasamento entre os pontos de contacto; (b) coluna com a compensação nas zonas de contacto. (falta imagem);



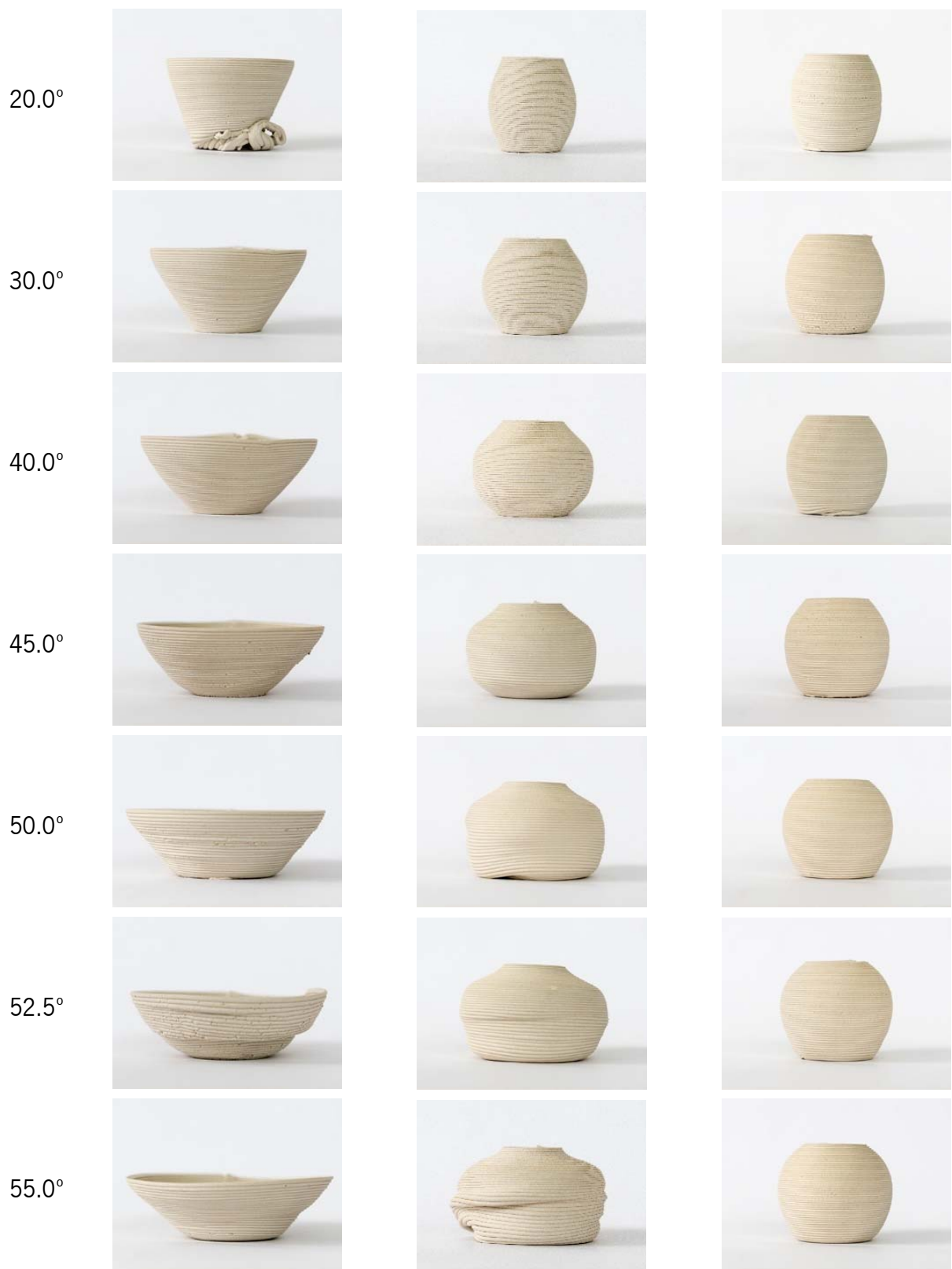
### **2.2.3.**

#### **Análises de extrusão e comportamento mecânico**

A análise de extrusão centrou-se em dois tipos de provetes, os cônicos e os cilíndricos, complementando a estas verificações, os ensaios mecânicos já realizados sobre provetes cilíndricos de diferentes configurações para caracterização mecânica.

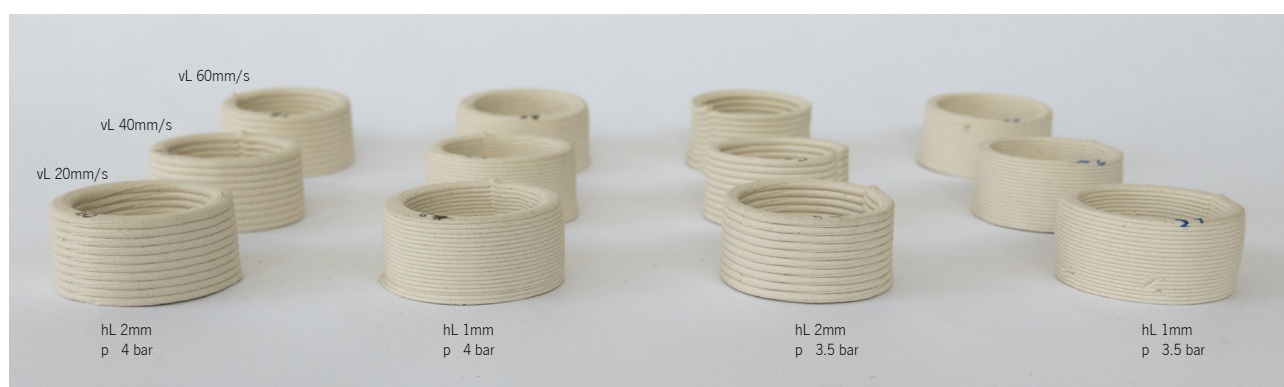
O desenvolvimento de provetes em cone, definiu limitações na utilização da tecnologia FA com recurso às pastas viscosas. Ao contrário do material polimérico, normalmente usado em equipamentos para a tecnologia FFF e FDM, o ângulo de abertura dos modelos desenvolvidos em argila é inferior à generalidade dos de polímero. Foram realizados testes aos limites de inclinação permitidos pela pasta cerâmica e pela tecnologia LDM. Executaram-se testes de inclinação pela impressão sequencial de superfícies “retas, semi curvas e curvas”, com inclinações compreendidas entre 20° e 55° (Cruz, 2017).

Os provetes foram desenvolvidos pelo equipamento Lutum®v2, instalado no ACLab, extrudidos a uma velocidade de fluxo constante de 40 mm/s e a uma velocidade de deslocação de 20 mm/s seguindo as coordenadas definidas criadas através de uma linha em espiral a uma altura de 1 mm em cada camada. A pasta cerâmica utilizada foi a Grés 130MP preparada com uma percentagem de humidade de cerca 35%. Como se pode observar na figura 2.14., o aumento do ângulo de inclinação permite a deformação das superfícies limitando a capacidade de suporte da própria estrutura.



**FIG. 2.14.** Provetes produzidos com a pasta 130MP e cozidos a 1260°C. A primeira coluna corresponde aos provetes com superfícies retas, a segunda com superfícies semi curvas e a terceira com uma supercie curva.

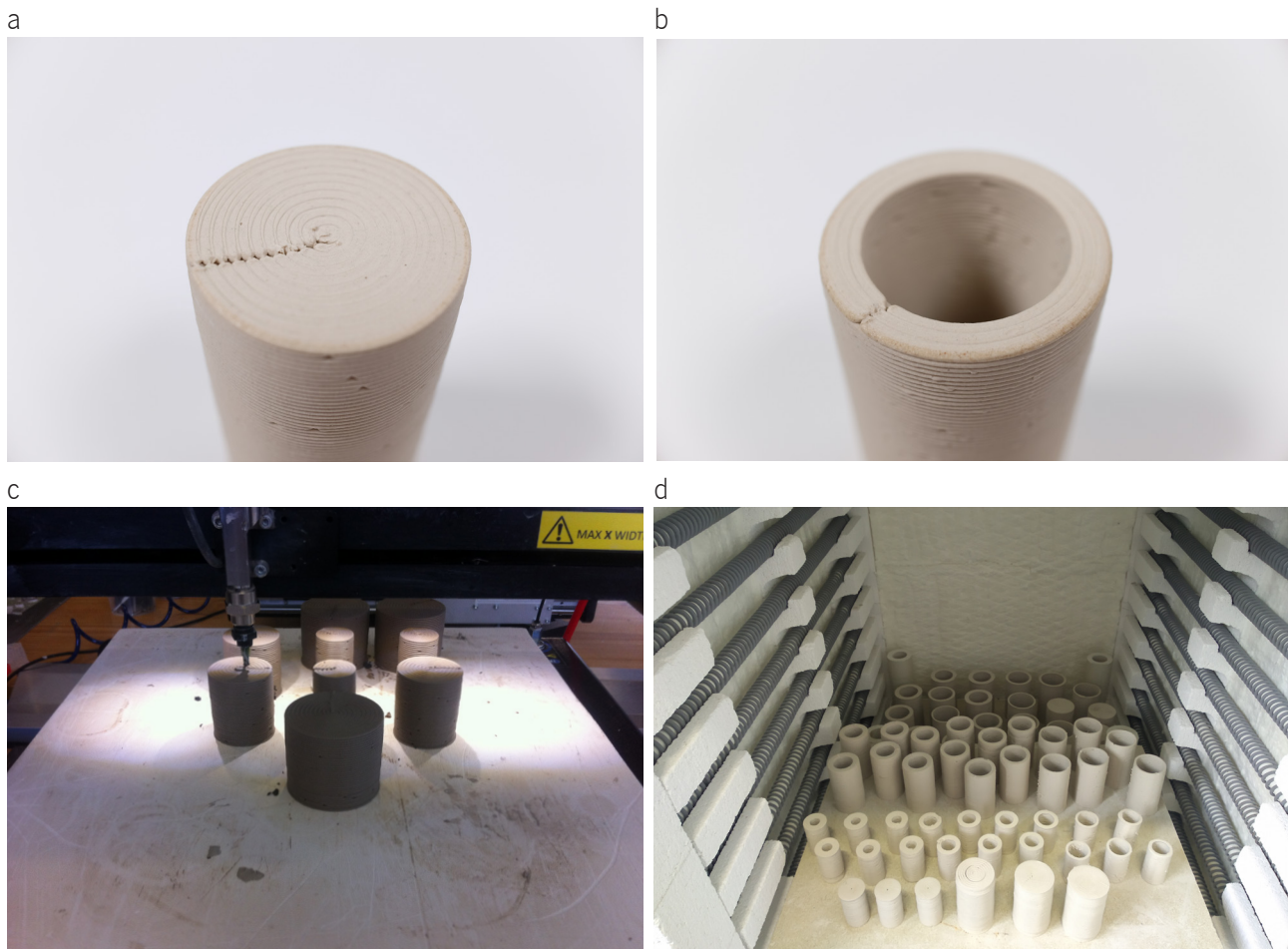
O controlo do parâmetro velocidade de deslocação, as velocidades do fuso da extrusora, para controlo do fluxo, a altura da camada e a pressão, foram consideradas na FA de perfis cilíndricos com o intuito de aferir as dimensões durante as várias fases do tratamento térmico até a cozedura a 1260°C. Na figura 2.15., estão representados os provetes testados com uma dimensão, projetada em modelo digital, de 20 mm de altura para uma largura de 40 mm.



**FIG. 2.15.** Provetes produzidos com a pasta 130MP e cozidos a 1260°C.

vL - velocidade de deslocação; hL - altura da camada; p - pressão do ar comprimido;

No ACLab foram desenvolvidos provetes cilíndricos com variações dimensionais em altura, largura e espessura. O objetivo principal focou-se na perceção do comportamento mecânico e retrações sobre um conjunto de perfis após cozedura a 1260°C. O grupo de ensaio estava seccionado em três tamanhos diferentes com diâmetros externos de 30 (S), 45 (M) e 60 (L) mm e alturas de 60, 90 e 120 mm. Cada um dos tamanhos têm quatro tipos de preenchimento das paredes que os constituem com variações entre uma parede (T1), duas paredes (T2), três paredes (T3) e totalmente preenchidos (Sol) como ilustra a Figura 20 com os exemplos T3L e SolL.



**FIG. 2.16.** Provetes produzidos com a pasta 130MP e cozidos a 1260°C para caraterização mecânica. (a) provete sólido (Sol); (b) provete tubular (T3); (c); FA dos provetes solidos (Sol S, M, L); (d) formada com o total dos provetes;

O material cerâmico utilizado na FA foi o Grés 130MP, extrudido por uma ponta extrusora de 3 mm de diâmetro a uma altura de 1,5 mm. Os provetes sofrem alterações das suas características devido à retração causada pela humidade existente, refletindo no diâmetro de cada provete após secagem e cozedura como mostra a tabela 2.1. Estão também representados os valores médios do comportamento mecânico dos perfis cerâmicos à compressão para cada caso.

**TAB. 2.1.** Percentagem de retração ( $\emptyset$ ) após cozedura a 1260°C. Valor médio dos ensaios à compressão  $\sigma$  (MPa).

<i>Provetes</i>	T1S	T2S	T3S	SolS
$\emptyset$	14,90%	13,23%	12,73%	15,22%
$\sigma$ (MPa)	77,15	127,25	124,18	93,19
<i>Provetes</i>	T1M	T2M	T3M	SolM
$\emptyset$	14,84%	13,66%	13,09%	15,61%
$\sigma$ (MPa)	86,17	132,15	122,96	84,65
<i>Provetes</i>	T1L	T2L	T3L	SolL
$\emptyset$	14,64%	13,68%	13,67%	15,89%
$\sigma$ (MPa)	81,79	83,72	136,8	96,5

## 2.2.4.

### Elementos de ligação

#### Hybrid – Clover

O protótipo Hybrid – Clover é constituído por peças tubulares de material polimérico e cerâmico com a forma semelhante à já descrita Myriad (FIG.2.17.). Após desenvolvimento dos perfis tubulares com material cerâmico recorrendo ao equipamento Lutum®v4.3 MXL Clay Printer, procedeu-se à digitalização tridimensional da superfície dos elementos cerâmicos, tendo sido usado o equipamento scanner 3D Steinbichler Comet 6 obtendo as dimensões da superfície da área de contacto e conseqüente desenvolvimento das peças em material polimérico. Este levantamento permitiu a modelação das peças de ligação com as dimensões e geometrias exatas de cada uma das partes de contacto. Os elementos de ligação foram produzidos, a partir do modelo tridimensional já configurado em função as dimensões obtidas, através da técnica FDM pelo equipamento Stratasys Fortus 900mc em ABS (Sampaio et. al, 2019).

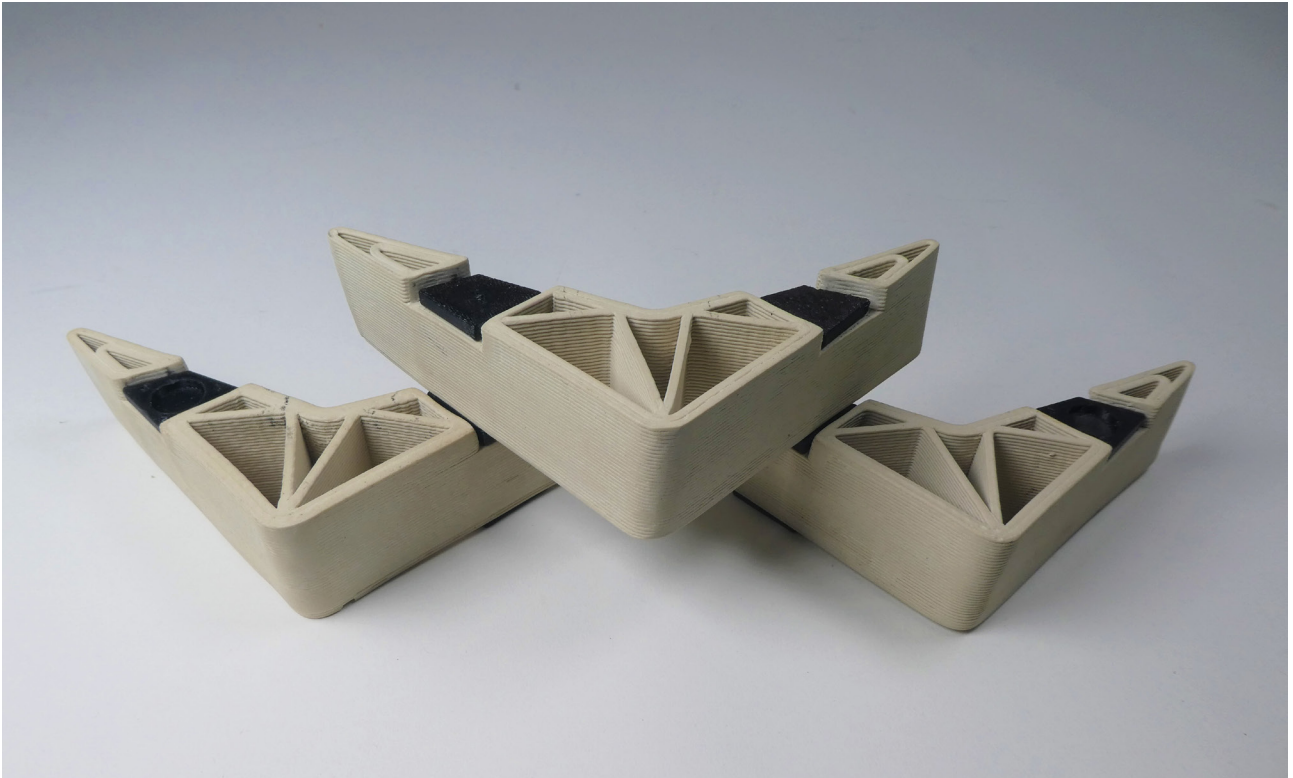


**FIG. 2.17.** Hybrid Clover ([www.aclab-idegui.org/hybrid-clover](http://www.aclab-idegui.org/hybrid-clover))

### **Hybrid – Embedded**

O protótipo cerâmico V-Brick mencionado no capítulo anterior, sofreu uma atualização tendo em vista a otimização sobre a forma de ligação. O conceito Hybrid – Embedded , refere a relação entre as técnicas FDM e LDM, material polimérico e cerâmico respetivamente, com a incorporação de acessórios produzidos com a AM em material polimérico ABS, possibilitando o empilhamento dos V-Brick através do bloqueio magnético induzido pelos imãs permanentes e atrito estático (FIG.2.18.). A utilização do scanner é relevante para a relação dos dois componentes, modelo estrutural e o modelo ligante, passando por uma captação dimensional da superfície da geometria que está em contacto com o elemento incorporado posteriormente.

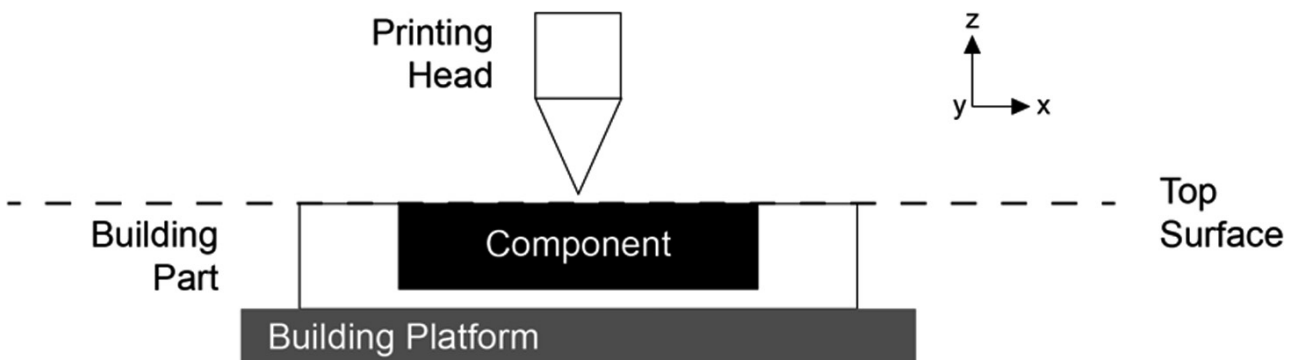




**FIG. 2.18.** Hybrid - Embedded ([www.aclab-idegui.org/hybrid-embedded](http://www.aclab-idegui.org/hybrid-embedded))

### Hybrid – Pin

Seguindo o conceito da projeção de produtos híbridos através da FA, este protótipo realça a necessidade de planejar a montagem com o controlo total das dimensões da peça onde será inserida o elemento de ligação. O processo de montagem, ocorre durante a fase de produção que só é possível com a projeção prévia do volume dos componentes a inserir e minimização da reorientação das peças durante a montagem.



**FIG. 2.19.** Hybrid - Pin, Ilustração da técnica usada para inserção do componente durante a FA, Sampaio et. Al, 2019.

Este processo exige a paragem momentânea a extrusão, para a incorporação do componente externo, no momento em que a cavidade criada garanta o alinhamento perfeito da superfície superior da última camada depositada com a da peça possibilitando o reinício do processo FA (Sampaio et. al, 2019).

## 2.3. Argilas

A argila obtém-se a partir da decomposição da chamada rocha-mãe através de ataques químicos ou físicos a fragmentam em pequenas partículas. Ao longo dos séculos, a cerâmica à base de argila pode obter diversas características, próprias das condições geológicas de um determinado local (Bechtold, 2015). A argila pode dividir-se em dois grupos: (1) argilas residuais, as que permanecem no local de origem sendo pouco atacadas pelas intempéries; (2) argilas sedimentares afastadas da rocha-mãe pelos agentes atmosféricos misturando-se com outros elementos orgânicos. As residuais caracterizam-se por uma cor mais clara, devido à sua pureza, baixo índice de plasticidade e com um ponto de fusão elevado. As argilas sedimentares constituem condições plásticas ótimas originadas pela leveza das partículas e pela mistura natural com outras matérias conferindo-lhes diversas tonalidades. A estas misturas estão associados elementos como o feldspato ou quartzo aumentando a resistência estrutural e ao choque térmico (Santoro, 2013).

No âmbito desta investigação, realizou-se uma visita à Fundação Castro Alves criada no ano 1979 em Vila Nova de Famalicão, com o intuito de perceber as fases seguintes à recolha no ponto de origem da argila. As fotografias da Figura 2.20. mostram os locais de trabalho para o tratamento da argila. A imagem a) representa o ponto de receção da argila crua para tratamento de limpeza e mistura com água até atingir a plasticidade necessária. A fundação dispõe de uma feira de perfis cilíndricos para posterior armazenamento e de um forno semi-industrial como mostra a imagem b) e c). Usam a cabine de vidragem de construção artesanal, imagem d), para acabamentos artísticos sobre os produtos a cru ou em chacota.





**FIG. 2.20.** Imagens captadas na visita à Fundação Castro Alves.  
(a) argila; (b) extrusora; (c) forno elétrico; (d) cabine de vidragem;

O critério de seleção das argilas a incluir no plano de ensaios, teve como base, a possibilidade de comparação das já utilizadas no ACLab com outras de diferentes características, nomeadamente as que são compostas por chamote. O estudo das argilas stoneware grés, porcelana e refratária permitem caracterizar a retração durante as várias fases do processo de cura, pré-cozedura e cozedura a diferentes temperaturas e consequente comportamento mecânico. As matérias viscosas descritas nos subcapítulos (2.3.1. Grés), (2.3.2. Porcelana) e (2.3.3. Refratária) são produzidas pelos fabricantes VICAR SA, CERAMICA COLLET S.A. e Goerg & Schneider.

### 2.3.1.

#### Grés

##### **Grés 130MP**

O grés trata-se de um material cerâmico normalmente aplicado em processos manuais e mecânicos tais como, técnicas de colagem, torneamento, extrusão e prensa. As suas principais características são a alta consistência e baixa absorção após cozimento à temperatura de sinterização vítrea. Fornecida em pasta, identificada com uma percentagem de humidade que pode variar de encomenda para encomenda. O fabricante e exportador é a empresa VICAR SA. Neste tópico, são apresentadas as composições mineralógicas e químicas resultantes das análises efetuadas sobre o Grés 130MP.

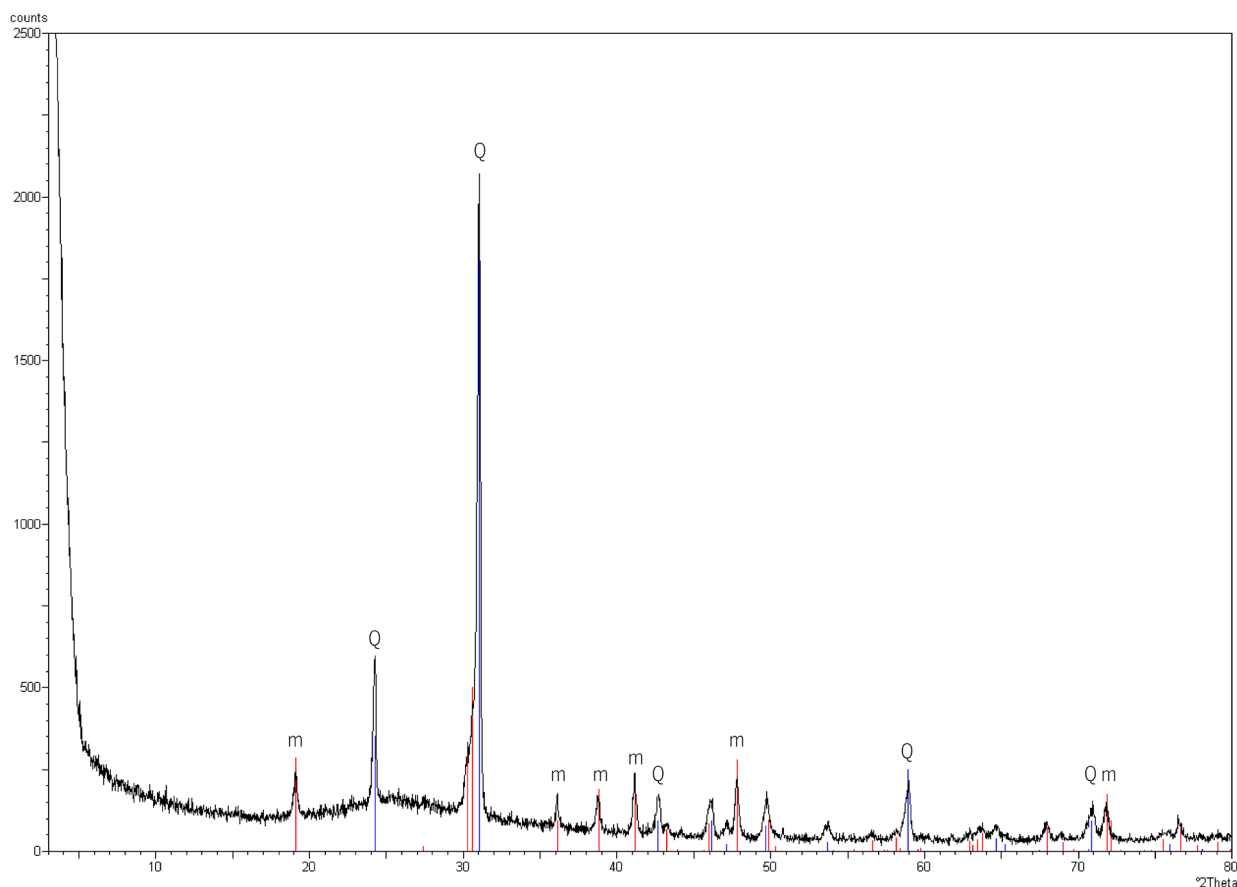
##### Composição mineralógica

As composições mineralógicas foram realizadas por difração de raio - X (XRD, Philips, X'Pert) - MDP,  $3-80^{\circ}2\theta$ ,  $0,025 \theta/s$ , tempo de aquisição 1,5 s/passo. Os padrões de difração foram analisados usando a base de dados do International Center of Diffraction Data (ICDD) no software EVA (Bruker). Os resultados obtidos para material cerâmico Grés 130MP cozidos a temperatura máxima de  $1260^{\circ}C$ , estão representados na Figura 2.21. Os padrões XRD mostram que as fases cristalinas identificadas na amostra são quartzo e mulite.

##### Composição química

A composição química quantitativa foi determinada após desfragmentação e moagem do grés por espectrometria de fluorescência de raio - X utilizando um espectrômetro WD-FRX Axiosmax. Como esperado, ambos os resultados, análise XRD e FRX, denotam que a pasta cerâmica consiste numa base de argila de grés convencional, em que as principais fases cristalinas após disparo são quartzo (composto essencialmente por  $SiO_2$ ) e mulite. (alumino-silicato, com a fórmula  $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ ). Foram identificados baixos teores de óxidos alcalinos ( $K_2O$  e  $Na_2O$ ) e alcalinoterrosos ( $MgO$  e  $CaO$ ) comuns na composição de várias argilas naturais e feldspato. Normalmente, a presença de algumas dessas impurezas, está relacionada com as cores cinza ou acastanhada típicas na pasta cozida stoneware.

Observa-se, na tabela 2.2., que para a amostra analisada o principal constituinte é o elemento sílica ( $\text{SiO}_2$ ), com percentagem de 72,25%. Quanto à alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) identifica-se com cerca de 22% da composição.



**FIG. 2.21.** XRD da cerâmica cozida a 1260°C. Picos identificados com: Q: quartzo e m: mullite.

**TAB. 2.2.** Análise química quantitativa por FRX (% em peso) da amostra.

$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{MgO}$	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{TiO}_2$	$\text{CaO}$	$\text{MnO}$	$\text{P}_2\text{O}_5$	Perda
72.66	22.17	0.90	1.74	0.80	0.79	0.83	0.36	0.01	0.06	-0.31

### **Grés 130MP CH Fino**

O material cerâmico Grés 130MP CH Fino é comercializado em pasta pela empresa VICAR SA, caracterizado essencialmente pela adição de chamote à sua composição química. É usado para as técnicas de extrusão, modelação, prensa e torno. O grão do chamote pode ir até os 0,6mm de diâmetro.

### **Grés 130MP CH Grosso**

A pasta cerâmica 130MP CH Grosso também produzido pela empresa VICAR SA, diferencia-se da 130MP CH Fino pelo grão chamotado que pode ir até os 2mm, limitando as técnicas em que pode ser aplicada mais indicada para modelação manual.

### **Masse N° 208**

Grés Masse N°208, é fornecido em pó para posterior transformação em pasta cerâmica normalmente usado para trabalhos manuais, para a modelação, trabalhos mecânicos e para a extrusão, produzido pela empresa alemã Goerg & Schneider (produtora de materiais cerâmicos desde 1924).

### **PCLI\*E**

A pasta cerâmica PCLI\*E é produzida pela empresa CERAMICA COLLET S.A. sediada em Barcelona desde 1874. Criou a marca SIO-2® atribuída à linha de material cerâmico para baixas e altas cozeduras, especiais, porcelana e a recentemente comercializa uma pasta com propriedades específicas para a impressão 3D.

Designada como Stoneware Paper Clay, composta por grés, fibras de papel e chamote com um grão até 0,2mm que confere uma boa plasticidade e simultaneamente atenua a formação de fissuras e problemas de deformação.

### **2.3.2.**

#### Porcelana

A porcelana é um material cerâmico compacto, frágil, duro, translúcido, impermeável e de baixa elasticidade são características gerais atribuídas a este tipo de material.

#### **POR-03C-AT**

A porcelana POR-03C-AT fabricado pela empresa VICAR SA é comercializado em pó atomizado transformado em pasta cerâmica normalmente usado para colagem de peças em porcelana. É atribuída uma boa plasticidade com 0% de absorção quando cozida a temperaturas compreendidas entre os 1240°C e os 1260°C.

#### **ANETO**

A pasta ANETO é definida pela empresa CERAMICA COLLET S.A. como porcelana para impressão 3D caracterizada pela boa plasticidade de cor branca e consistência elevada. É comercializada em embalagens cilíndricas de 5Kg.

### **2.3.3.**

#### Refratária

As pastas cerâmicas apresentadas são produzidas pela empresa CERAMICA COLLET S.A. inseridas na linha SIO-2®.

#### **PRLF**

PRLF é uma pasta refratária com 40% de chamote entre 0 e 0,5mm de diâmetro normalmente aplica em técnicas artísticas como esculturas ou

Raku. A quantidade de granulado inserido na sua composição, oferece uma textura expressiva à superfície dos produtos desenvolvidos conferindo um bom comportamento ao longo do processo de cura e cozedura. É assumido como material cerâmico de cor marrom para altas temperaturas atingindo um limite de 1300°C durante o processo de cozedura.

## PRNF

À semelhança da PRLF, esta também oferece uma textura rugosa de cor negra, composta por 40% de chamote com tamanho máximo de 0,5mm melhorando o comportamento do material durante os momentos de cura e cozedura. A temperatura máxima admissível para a cozedura é de 1260°C.

## PRAI

Com excelentes características para esculturas e técnica Raku, a pasta PRAI é brindada por uma cor marfim após cozedura a uma temperatura entre os 1240°C e os 1300°C com uma textura expressiva devido aos 40% de chamote de 0,2mm.

**TAB. 2.3.** Características das pastas definidas pelo fabricante.

Referência	Tipo	Intervalo Temp. Max. (°C)	Retração (Cru) (%)	Retração (Cozido) (%)	Absorção (%)	CTE $10^{-7} K^{-1}$
130MP	Pasta	1240 -1280	12,3	6,5	0-2	68-73
130MPCH-Fino	Pasta	1240 -1280	12	6	0-5	52-57
130MPCH-Grosso	Pasta	1240 -1280	11	5,5	1-4	52-57
POR-03C-AT	Pó	1240 -1280	11	8	0	50-55
PCLI	Pasta	1100 -1260	7,2	6	4,2	53,7
PRNF	Pasta	1200 -1260	7	4,5	9,4	55,8
PRLF	Pasta	1240 -1300	6,7	5	8,8	52,3
ANETO	Pasta	1230 -1270	6	9,8	0	59,2
PRAI	Pasta	1240 -1300	5,9	7	0	52,6
208	Pó	1070 -1200	4	4	3	90

# 3.

## Metodologia para a caracterização das pastas

No ACLab, a pasta cerâmica mais utilizada é o grés 130MP da VICAR SA normalmente caracterizada em cada encomenda pelo método Pfefferkorn. Para este estudo foram selecionadas as argilas do tipo grés, porcelana e refratária, oito delas em pasta, incluindo a já usada, grés 130MP e duas em pó, diferenciadas entre si pela humidade e percentagem de chamote definida pelo fabricante. No entanto, existe a necessidade de preparar as pastas com a viscosidade ideal para a FA tendo em consideração os equipamentos que as vão usar.

O presente capítulo descreve o procedimento de preparação da pasta para a FA, recorrendo ao método Pfefferkorn para aferição do melhor índice de plasticidade, como se explica no subcapítulo 3.1 Processo do método Pfefferkorn. É apresentada uma solução em 3.2 Otimização da pasta cerâmica para a qualidade de extrusão, para mais facilmente se obter a quantidade necessária de água a adicionar nas matérias viscosas, tendo como base, os registos obtidos pelas análises anteriormente efetuadas sobre a mesma matéria. No subcapítulo 3.3 Procedimento da Fabricação Aditiva, são apresentadas as características dos provetes e análise ao comportamento das argilas durante o processo da FA. Estão representados em 3.4 Pré-cozedura, os passos mais pertinentes para o melhor tratamento sobre os provetes antes de se submeterem às curvas de cozedura. O subcapítulo 3.5 Cozedura, descreve cada uma das curvas de cozedura utilizadas e por último, em 3.6 Resultados, estão representados os resultados com as respetivas ilustrações e análises sobre os provetes desenvolvidos.

## 3.1.

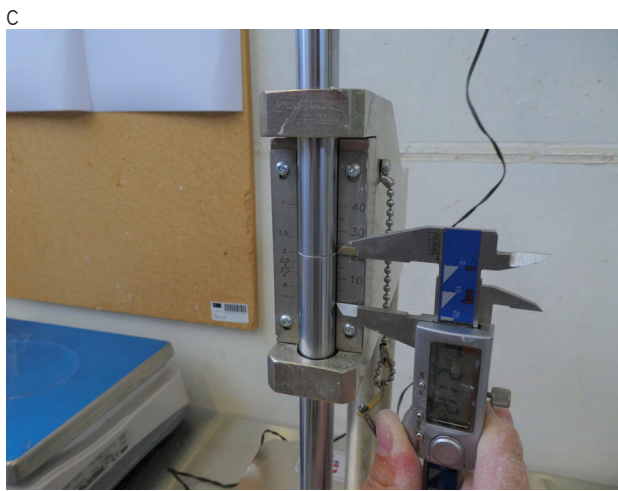
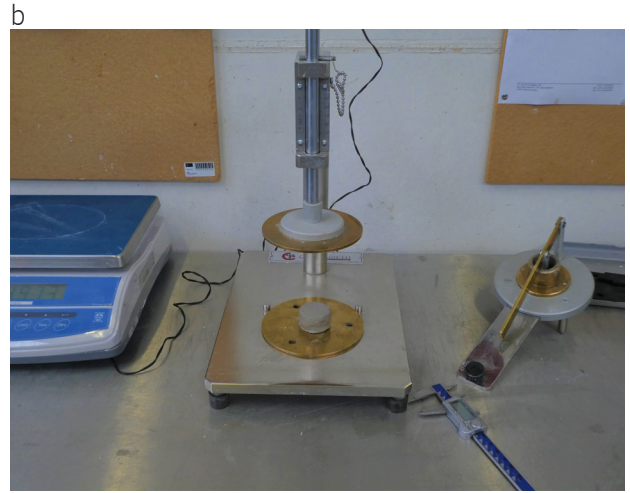
### Aplicação do método Pfefferkorn

O índice de plasticidade das argilas é avaliado indiretamente através da medição de outras propriedades, sendo a técnica mais comum a que recorre à utilização do plasticímetro de Pfefferkorn (Pfefferkorn, 1924). No método Pfefferkorn um provete cilíndrico com um diâmetro de 33 mm e uma altura de 40 mm, produzido manualmente ou por extrusão, é deformado pela queda de uma placa com a massa de 1,192 kg. O quociente entre a altura inicial e a altura após deformação define o rácio de deformação.

Os resultados são normalmente representados sob a forma de gráficos que representam a redução de altura em função do teor de humidade. O índice de plasticidade de Pfefferkorn é o valor percentual de humidade da amostra quando a altura final for igual a 12 mm.

Após a formação de uma pasta homogénea são preparados 5 provetes utilizando o molde metálico do equipamento e posteriormente são ensaiados. A altura final dos provetes deve ser medida com um paquímetro analógico de resolução de 0,05 mm e pesados numa balança digital de 0,01 g. Pulverizar água sobre a pasta restante e preparar mais cinco provetes, ensaiando-os posteriormente. Este procedimento será repetido até que a altura final dos provetes seja igual ou inferior a 12 mm. Na figura 3.1.a) está representado o plasticímetro utilizado no método Pfefferkorn, a figura 3.1.b) ilustra o provete cilíndrico antes da queda da placa e na figura 3.1.c) observa-se a altura atingida após a queda da placa com auxílio de um paquímetro.

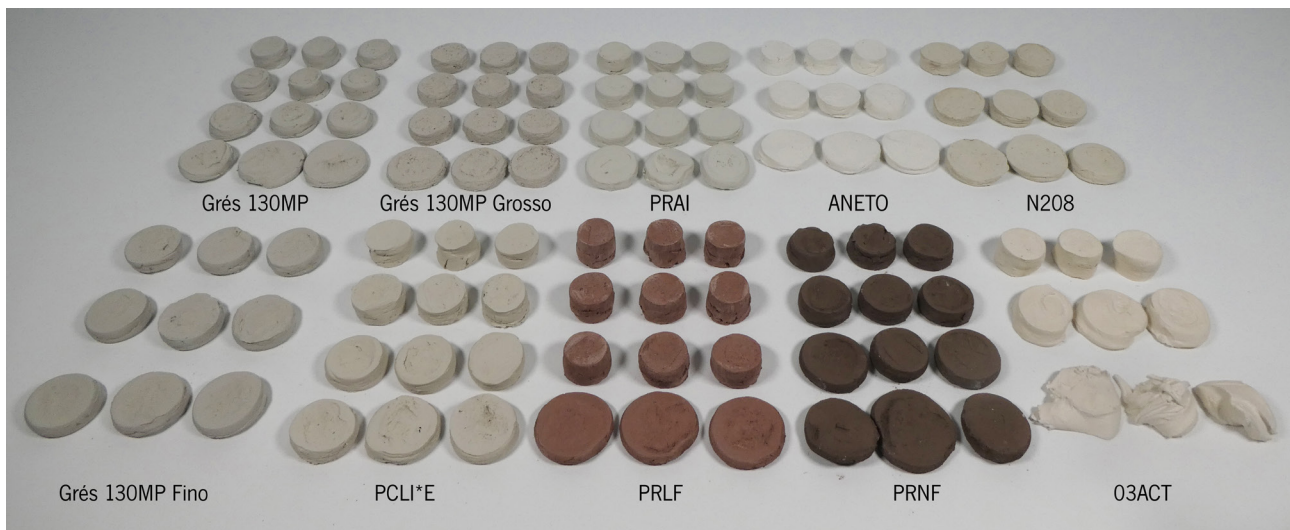




**FIG. 3.1.** Equipamentos usados para execução do método Pfefferkorn.  
(a) plasticímetro Pfefferkorn; (b) provete; (c) medição do abatimento do provete;

Em seguida, os provetes são inseridos dentro de uma estufa com temperatura de  $110 \pm 10^\circ\text{C}$  para determinar a humidade dos provetes a fim de determinar o índice de plasticidade de Pfefferkorn.

A Figura 3.2. mostra os provetes desenvolvidos para aferir o melhor índice de plasticidade em cada pasta. Após passagem pela estufa de acordo com o procedimento, é perceptível a diferença de alturas presente entre os provetes com o achatamento mais acentuado nos últimos de cada ensaio.



**FIG. 3.2.** Provetes usados para aferir o melhor índice de plasticidade.

## 3.2.


### Otimização da pasta cerâmica para a qualidade de extrusão

Para cada tipo de material cerâmico, é fornecida pelo fabricante, uma ficha técnica com as características e descrição que sejam pertinentes para o utilizador. Neste caso, o valor com interesse para a investigação é o corresponde ao da humidade indicado na ficha técnica, que muitas vezes não corresponde ao existente no momento de utilização da argila. A diferença de valores entre a humidade inicial de fábrica e da sua utilização, pode acontecer em várias etapas, desde o tempo de armazenamento em fábrica, o tempo de transporte até o fornecedor e armazenamento assim como o transporte até o cliente final e armazenamento. Não tendo a certeza do perfeito condicionamento da matéria durante os vários períodos de toda a logística desde o fabrico até a receção do material, é necessário, confirmar o teor de humidade real em cada pasta para cada encomenda.

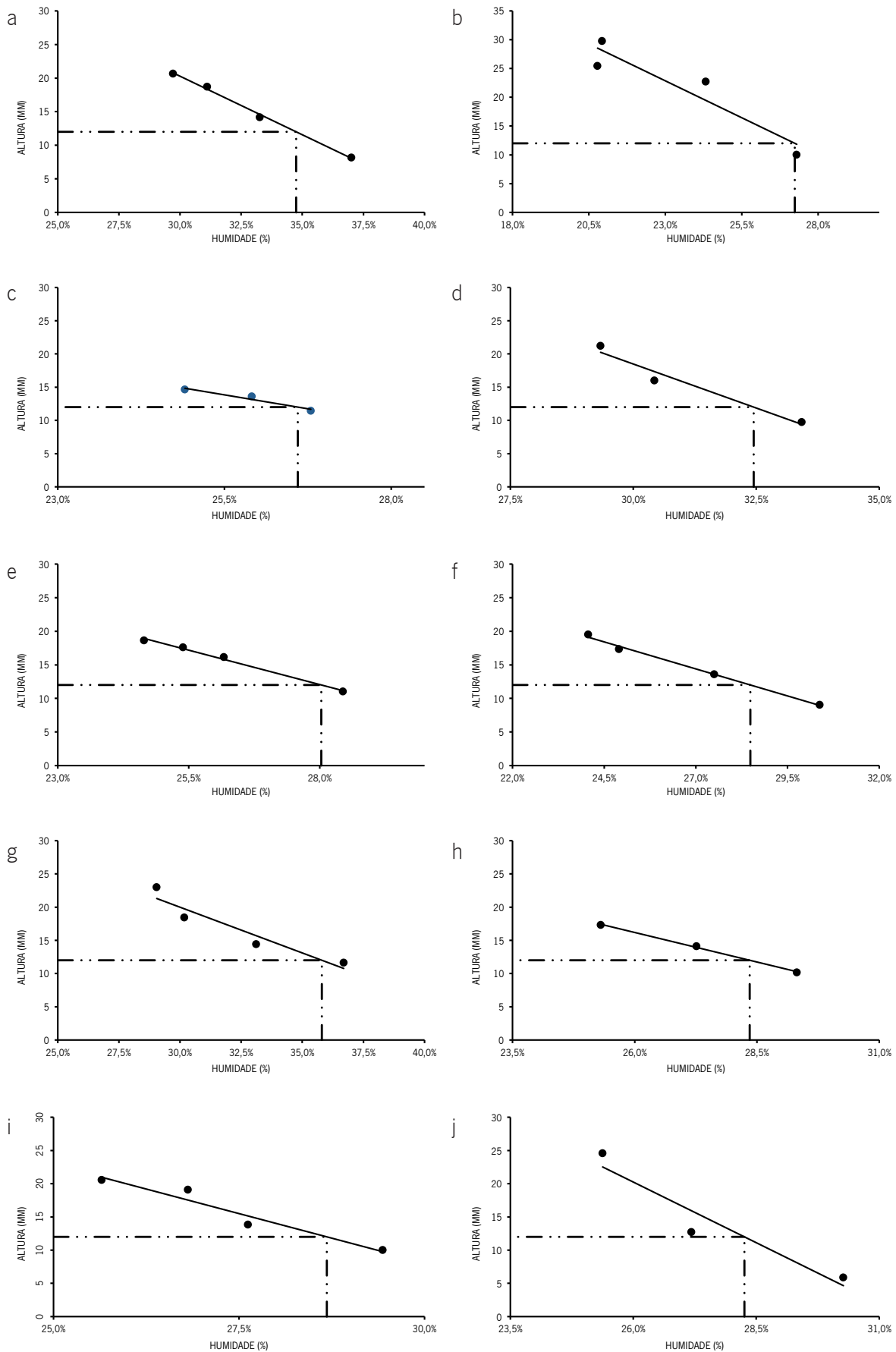
O processo de caraterização do estado inicial da pasta cerâmica,

passa pelo registo de dados nos campos m1, peso inicial e m2, peso após a passagem pela estufa a 110°C. Na tabela 3.1., os resultados da primeira interação com a pasta, estão representados nos três primeiros provetes ensaiados com o plasticímetro Pfefferkorn, ainda durante este passo, é registado o valor na coluna identificada como final height para caracterização do índice de plasticidade. No exemplo apresentado, o resultado da percentagem de humidade inicial é de 29,7% (U(%)) com uma percentagem final de 37% (U(%)) após aplicação do método Pfefferkorn. Conclui-se que, para o grés 130MP com a identificação E70 (experiment), o melhor IP é de 34,75% correspondente à altura final igual a 12 mm medido após a queda da placa do plasticímetro Pfefferkorn.

**TAB. 3.1.** Tabela para inserção dos valores recolhidos através do método Pfefferkorn.

 PFEFFERKORN METHOD										
date	material	experiment	test	m1 (g)	m2 (g)	average m1 (g)	average m2 (g)	final height (mm)	average fh (mm)	U (%)=(m1-m2)/m2
08/07/2019	Grés 130MP	E70	1	64,2	49,6	64,2	49,5	21,28	20,67	29,7%
			2	64,1	49,4			20,92		
			3	64,2	49,4			19,80		
			4	63,4	48,5	62,9	48,0	17,88	18,74	31,1%
			5	63,1	48,1			19,50		
			6	62,3	47,4			18,83		
			7	62,0	46,3	61,7	46,3	13,87	14,18	33,3%
			8	61,2	45,8			14,24		
			9	61,9	46,8			14,42		
			10	59,6	43,5	60,5	44,1	9,22	8,19	37,0%
			11	61,3	44,8			7,61		
			12	60,5	44,1			7,73		

No presente estudo, para cada uma das dez pastas mencionadas no subcapítulo 2.3. Argilas, foi verificado o IP ideal para a FA e posterior preparação da pasta em função da percentagem obtida. A figura 3.3., ilustra os gráficos com a linha de tendência linear para cada material com base nos dados inseridos na tabela de dados “PFEFFERKORN METHOD”. O exemplo apresentado na tabela 3.1., representa o registo de dados para a pasta 130MP, dos quais resultaram o gráfico visível na figura 3.3.a) com IP de 34,75%. A partir da equação associada à linha de tendência linear constituída pelo coeficiente linear, coeficiente angular, a letra (y) que representa a altura no gráfico e a letra (x) que representa a humidade, é indicada a percentagem do IP em (x) assumindo em (y) o valor 12 mm, sendo este o valor representativo do IP ideal pelo método Pfefferkorn.



**FIG. 3.3.** Comparação dos índices de plasticidade entre as pastas utilizadas.

(a) 130MP, IP 34,75%, R<sup>2</sup> 0,996; (b) PRLF, IP 27,24%, R<sup>2</sup> 0,878; (c) 130MP FINO, IP 26,6%, R<sup>2</sup> 0,943; (d) ANETO, IP 32,45%, R<sup>2</sup> 0,956; (e) 130MP GROSSO, IP 28,03%, R<sup>2</sup> 0,992; (f) PRNF, IP 28,49%, R<sup>2</sup> 0,994; (g) PCLI\*E, IP 35,8%, R<sup>2</sup> 0,904; (h) N°208, IP 28,35%, R<sup>2</sup> 0,998; (i) PRAI, IP 28,68%, R<sup>2</sup> 0,939; (j) O3ACT, IP 28,26%, R<sup>2</sup> 0,909;

Com base na equação da linha de tendência linear, foi criada uma tabela para o cálculo da quantidade de água a adicionar correspondente à quantidade de pasta a utilizar na FA. A tabela 3.2. mostra o exemplo utilizado para o grés 130MP com a adição de 277g para uma quantidade de 5500g de pasta original, ou seja, com a percentagem de humidade aplicada pelo fabricante. Para cada uma das matérias viscosas são definidas percentagens diferentes condicionando a adição de água necessária para obter o IP ideal.

**TAB. 3.2.** Tabela para obter valor da quantidade de água a adicionar em função da quantidade de pasta Grés 130MP a usar.

Designação	Descrição	Valor
Peso da pasta sem adição de água	Quantidade de pasta a utilizar no FA	5500 g
Percentagem de humidade inicial	Resultado obtido no ensaio dos primeiros provetes conforme método <i>Pfefferkorn</i>	29,7%
Percentagem de humidade desejada	Resultado em função de $X$	34,7%
Quantidade de água a adicionar	Resultado obtido com a relação os parâmetros, peso da pasta, humidade inicial, humidade desejada	277,6862302 g
$Y$	Resultado em função de $X$	34,75%
$X$	Valor assumido	12
Coefficiente linear	Valor da equação	72,57790764
Coefficiente angular	Valor da equação	174,3307307
Coefficiente de determinação	Razão	0,996139166

Estando a pasta já preparada para a FA, foi definido um processo comparativo entre os resultados registados durante o procedimento do método *Pfefferkorn* e os obtidos após mistura da pasta com a quantidade de água adicionada. Está representado na tabela 3.3., a quantidade de água necessária (Qtd água) para atingir o IP ideal ( $H_o$ ) em cada uma das pastas. Alguns dias depois da preparação da pasta ( $vDias$ ), com auxílio do plasticímetro do método *Pfefferkorn*, fizeram-se as comparação ( $vPf$ ) dos resultados adquiridos em altura ( $A$ ) e humidade ( $H$ ), concluindo que, nas pastas E70, E73, E74, E75 e E77 os valores em altura estão muito próximos dos 12 mm correspondendo de igual forma comparando os resultados em ( $H_o$ ) e ( $H$ ).

**TAB. 3.3.** Valores do método Pfefferkorn, preparação da pasta e validação através do método Pfefferkorn.

<i>ePf</i>	<i>mPf</i>		<i>pDias</i>	Pasta preparada para FA		<i>vDias</i>	<i>vPf</i>		
	<i>Hi</i>	<i>Ho</i>		Material	<i>Qtd(g)</i>		<i>Qtd água (g)</i>	<i>A (mm)</i>	<i>H (%)</i>
E70	29,70%	34,75%	23	Grés 130 MP	5500	1	277	12,17	34,23%
E71	24,91%	26,60%	22	GRÉS 130 MP FINO	5500	3	93	8,93	26,59%
E72	24,65%	28,03%	22	GRÉS 130 MP GROSSO	5500	2	186	8,4	29,65%
E73	29,05%	35,8%	22	PCLI*E	5500	7	371	11,68	36,83%
E74	25,6%	28,7%	22	PRAI	5500	6	166	11,65	28,74%
E75	20,9%	27,2%	31	PRLF	5500	3	347	13,12	29,49%
E76	29,3%	32,4%	21	ANETO	3900	8	121	N/A	N/A
E77	24,1%	28,5%	30	PRNF	5500	4	243	11,07	29,21%
E78	25,3%	28,4%	34	N208	2120,3	1	64,5	8,79	30,25%
E79	25,4%	28,3%	29	03ACT	5786	3	166,72	N/A	N/A

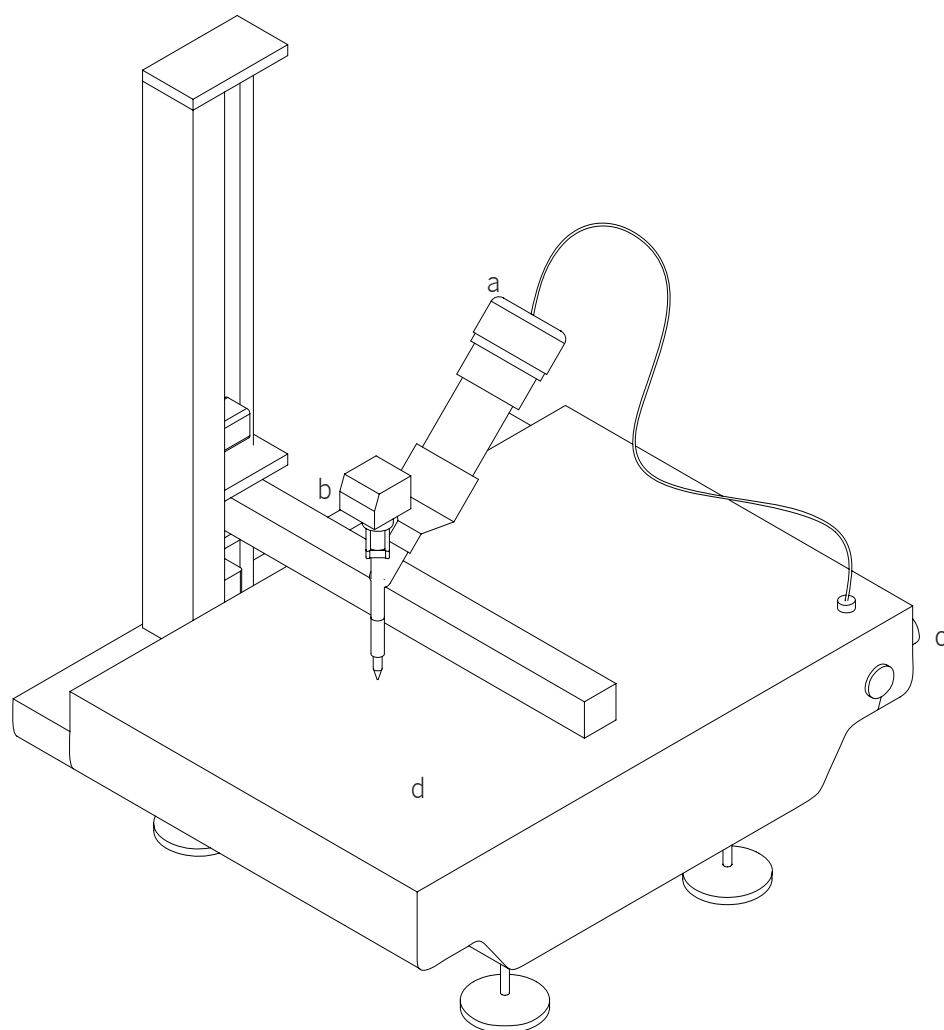
### 3.3.

## Procedimento da Fabricação Aditiva

O presente subcapítulo visa sintetizar o processo de FA desde a fase de preparação até a fase de cozedura dos provetes. Finalizado o processo de caracterização das pastas cerâmicas e devidamente catalogadas, iniciou-se a fase de preparação do *layout* necessário para a FA. Sabendo da importância de uma ótima qualidade de extrusão das pastas cerâmicas, o condicionamento das mesmas, após a mistura com água, serve como ponto de início para atingir um dos objetivos do presente estudo. O espaço temporal entre a preparação da pasta e a sua utilização situava-se entre um a oito dias (TAB.3.3., em *vDias*), garantindo o repouso e uniformidade das características da pasta. O tempo de repouso termina na passagem da matéria viscosa para os cartuchos cilíndricos – 640cc e 1400cc – carregados manualmente e devidamente selados após introdução de uma pressão até aproximadamente 4 bars com o intuito de aumentar a consistência da pasta no seu interior.

Num passo anterior à utilização da técnica de extrusão da pasta, processo semelhante ao Liquid Deposition Modeling (LDM), enunciada no subcapítulo 2.1. Técnicas da Fabricação Aditiva, os cartuchos ficavam em repouso entre uma manhã ou um dia para que todo o processo de mantivesse rigoroso até o momento de produção. Para o desenvolvimento dos provetes usou-se o equipamento Lutum@v4.3 MXL Clay Printer da VormVrij, presente no Advanced Ceramics R&D Lab, inserido no Instituto de Design de Guimarães da Universidade do Minho, constituído por uma plataforma de suporte à FA, ar comprimido debitado pelo equipamento ROTAR MICRO 510 SE 200, um cartucho, uma extrusora controlada por servo motor e um pórtico de deslocação controlado por três servo motor para os eixos X, Y e Z como se pode observar na figura 3.4.

Para a fabricação dos vários provetes, de acordo com o tipo de fabrico adotado, é necessária a geração do código numérico G-Code.

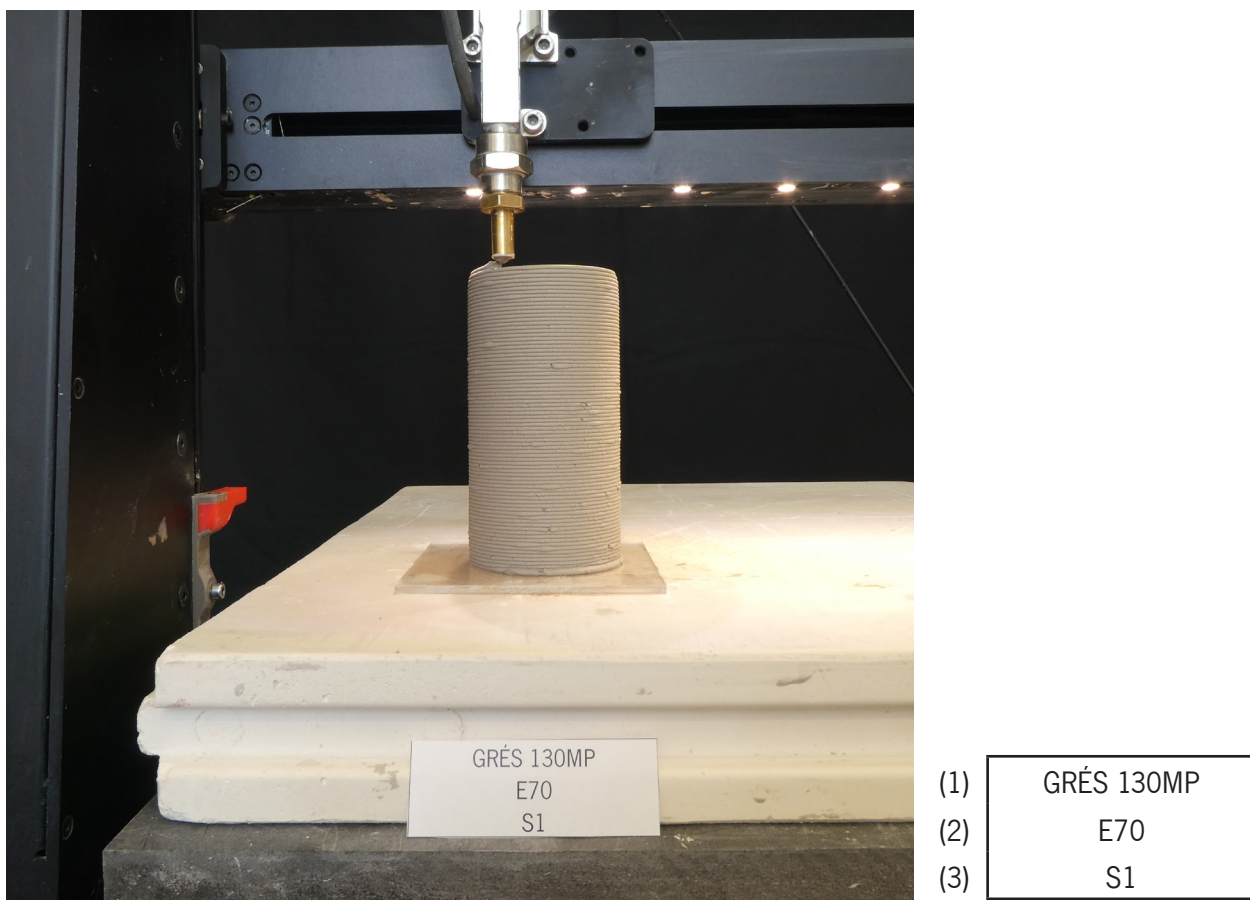


**FIG. 3.4.** Equipamento Lutum@v4.3 MXL Clay Printer.  
(a) cartucho; (b) extrusora; (c) ar comprimido; (d) plataforma;



Este código contém todas as instruções para a produção do modelo, desde a velocidade de deslocação entre os eixos à velocidade da rotação do fuso permitindo uma extrusão exata do material. Neste caso, recorreu-se ao software de modelação 3D Rhinoceros e do software Slic3r open source 3D.

Não menos importante, devido ao número de provetes a desenvolver, foram criadas referências organizadas atribuídas a cada corpo cerâmico acompanhando-os desde a sua criação até o momento de ensaio mecânico. Como podemos verificar na figura 3.5., foram recortados indicadores em papel com a seguinte ordem de catálogo: (1) nome da pasta, designação atribuída pelo fabricante; (2) o código atribuído na tabela de registos do ACLab; (3) o número do provete entre S1 e S9. Este procedimento foi relevante para o rigor no registo de dados, uma vez que, o número considerável de provetes, facilmente se podiam confundir na transição das diversas fases até o final do estudo.

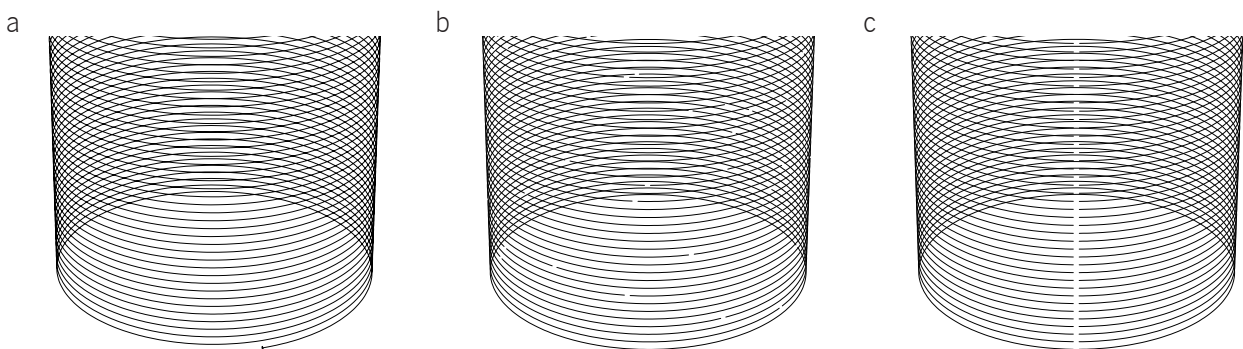


**FIG. 3.5.** Exemplo do tipo de referência para cada um dos provetes desenvolvidos.



### 3.3.1. Caraterísticas dos provetes

Como já referido no presente subcapítulo 3.3. Procedimento da Fabricação Aditiva, é subjacente a necessidade de criar instruções para o fabrico dos provetes, definidas pela linguagem de programação G-Code. As ordens foram criadas a partir da interface do software Slic3r com as configurações dos parâmetros para a FA definindo, as velocidades de rotação para controlo da extrusão, velocidade de deslocação, altura das camadas a depositar e o diâmetro da ponta extrusora. A Figura 3.6., mostra as três possibilidades, disponíveis no Slic3r, do trajeto que a extrusora pode percorrer para a deposição do material até a conclusão do provete de perfil cilíndrico tubular.



**FIG. 3.6.** As possibilidades para o trajeto de extrusão.  
(a) espiral contínua; (b) pontos de início aleatórios; (c) pontos de início próximos;

A opção figura 3.6.a) foi a selecionada para o desenvolvimento dos provetes constituídos apenas por uma parede em espiral cilíndrica. O modelo foi parametrizado com uma altura por camada de 1,5 mm atribuída no parâmetro *Layer Height*, do software Slic3r, incrementando-as até a altura máxima do provete de 120 mm com diâmetro de 60 mm. Estas dimensões resultam num percurso de FA com um comprimento de aproximado de 15000 mm.

A ponta extrusora utilizada em todo o processo da FA, tem um diâmetro de 7,26 mm assumida nas variáveis do software com uma velocidade de deslocação entre os eixos X, Y e Z de 20 mm/s sendo que, para a velocidade do fuso foi atribuído 12 mm/s com uma pressão de aproximadamente 4,5 bars. Os dois últimos parâmetros, permitiram controlar a consistência da pasta, com a possibilidade de ajustar a pressão do ar comprimido com o fluxo no momento da deposição da matéria viscosa,

e assim melhorar o aspeto visual da superfície dos provetes e a própria estrutura.

### 3.3.2.

#### Comportamento das pastas na Fabricação Aditiva

Durante o procedimento da FA descrito anteriormente em 3.3 Procedimento da Fabricação Aditiva e 3.3.1 Características dos provetes a produzir, detetaram-se comportamentos diferenciados entre as pastas assim como a ocorrência de uma alteração técnica do equipamento para a extrusão da matéria viscosa 130MP GROSSO.

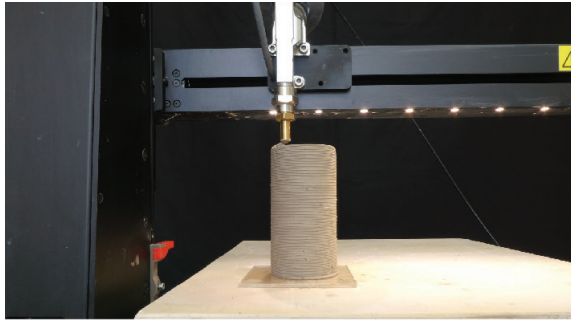
Neste subcapítulo estão mencionados os acontecimentos de destaque durante a utilização da técnica AM seguindo os parâmetros apresentados na tabela 3.4., influenciados pelas características das pastas no ato da extrusão. Como se pode observar na coluna (P), pressão aplicada sobre o cartucho, os valores variam de pasta para pasta, isto porque, visualmente é perceptível a necessidade de ajustar no primeiro provete desenvolvido como teste. Todos os corpos cerâmicos foram produzidos com um fluxo idêntico, apresentado em (VFluxo), velocidade do fluxo induzida pela extrusora, exceto o da pasta

**TAB. 3.4.** Tabela com os parâmetros para o desenvolvimento dos provetes

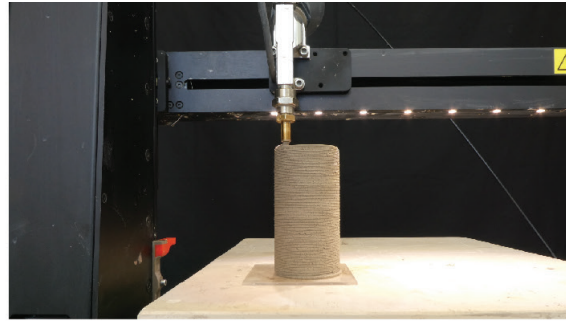
<i>ePf</i>	Material	<i>P</i> (bar)	<i>VFluxo</i> (%)	<i>VDeslocação</i> (%)	<i>ØExtrusora</i> (mm)	<i>Acamada</i> (mm)	<i>Atotal</i> (mm)	<i>ØProvete</i> (mm)
E70	Grés 130 MP	4,5	60	100	7,26	1,5	120	60
E71	Grés 130 MP Fino	4,25	60	100	7,26	1,5	120	60
E72	Grés 130 MP Grosso	4,25	0	100	7,26	1,5	120	60
E73	PCLI*E	4,25	60	100	7,26	1,5	120	60
E74	PRAI	5	60	100	7,26	1,5	120	60
E75	PRLF	5	60	100	7,26	1,5	120	60
E76	ANETO	4,25	60	100	7,26	1,5	120	60
E77	PRNF	5	60	100	7,26	1,5	120	60
E78	N208	4,25	60	100	7,26	1,5	120	60
E79	03ACT	1,5	60	100	7,26	1,5	120	60

- E72 Grés130MP Grosso - não tendo sido aplicada qualquer instrução à extrusora durante a FA. A granularidade próxima dos 2 mm, como descrito no subcapítulo 2.3.1 Grés, não permitia a utilização do fuso incorporado no componente estrutural da extrusora limitado pelo espaçamento entre o mecanismo de extrusão. Assim sendo, optou-se apenas pelo controlo manual da pressão diretamente induzida desde a entrada no cartucho até a saída na ponta de 7,26 mm.

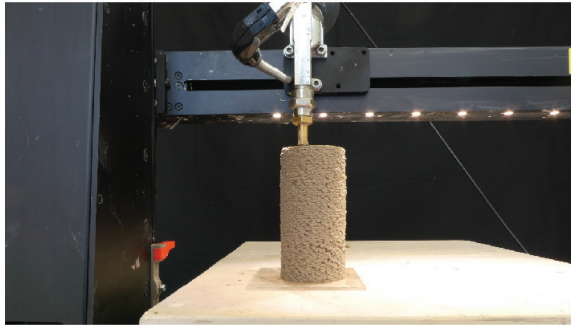
Grés 130MP



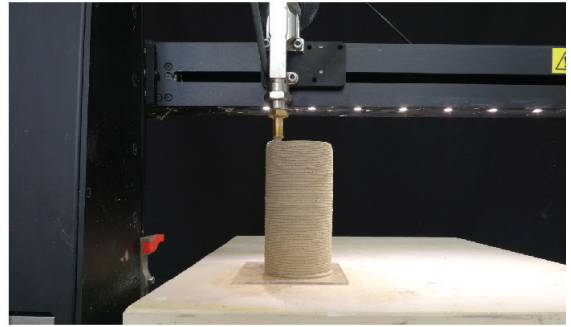
Grés 130MP Fino



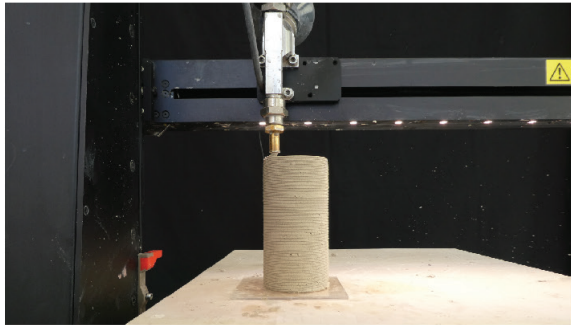
Grés 130MP Grosso



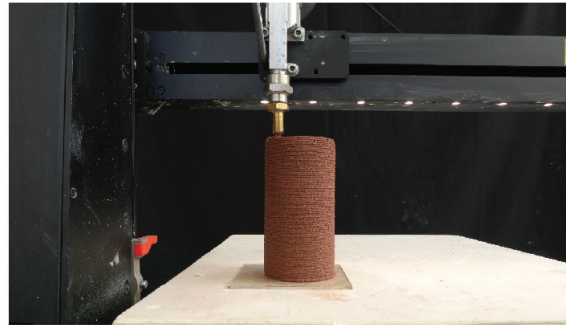
PCL1\*E



PRAI



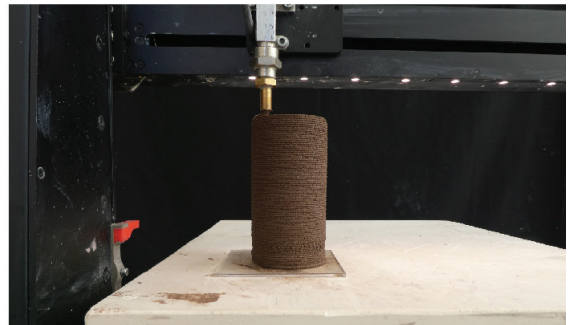
PRLF



ANETO



PRNF



N208



03 ACT

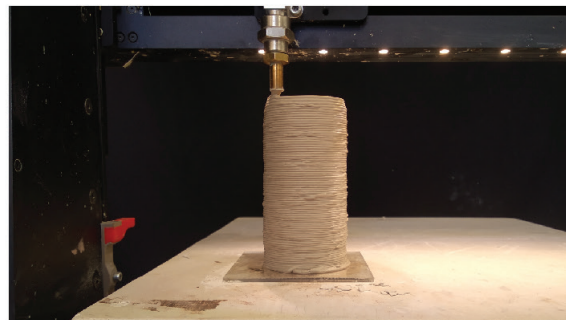


FIG. 3.7. Ilustração com provetes de cada pasta na fase da FA.

Na figura 3.7., na imagem designada por Grés 130MP Grosso, percebe-se a textura da superfície fortemente caracterizada pela sua rugosidade comparada com as superfícies dos provetes desenvolvidos com a pasta PRLF e PRNF também compostas por chamote com granulometria de 0,5 mm. Estão ilustrados os primeiros provetes de cada pasta, sobre a plataforma da Lutum@v4.3 MXL, fotografados logo após o término da FA. O tempo médio de desenvolvimento de cada provete é de 12 minutos e 18 segundos a uma velocidade de deslocação de 20 mm/s.

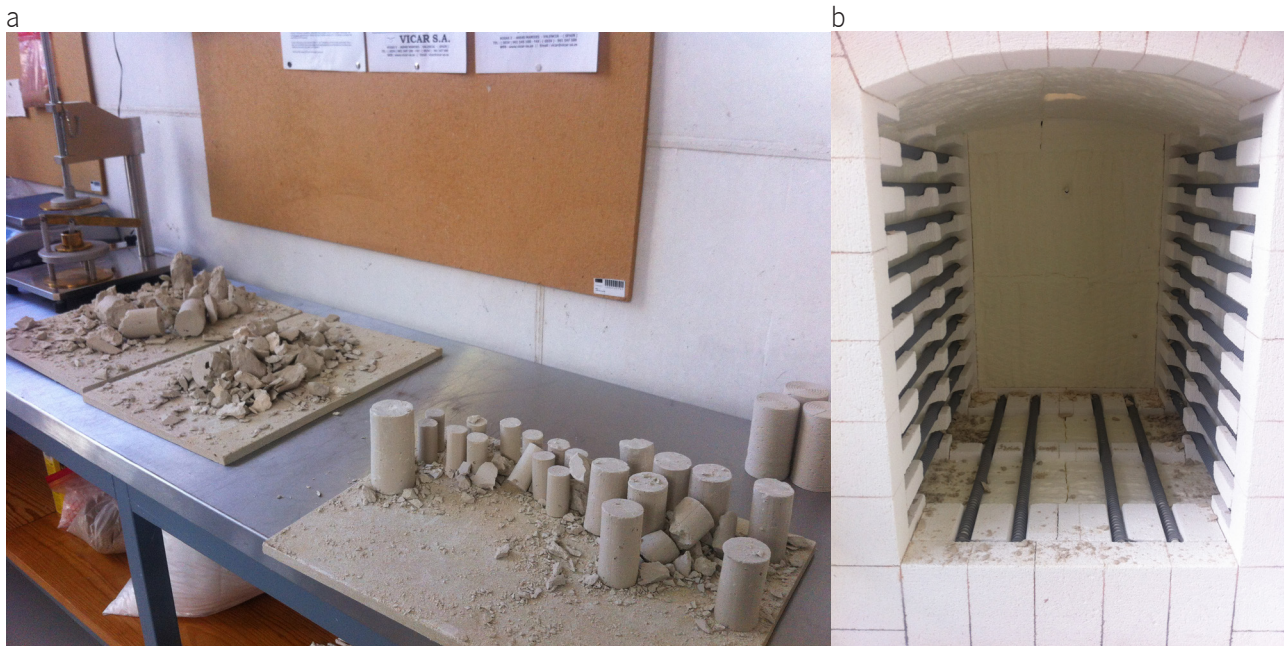
## 3.4. Pré-cozedura

Este subcapítulo visa descrever os vários procedimentos inseridos no processo da pré-cozedura, desde o registo de dados entre as várias fases de tratamento dos corpos cerâmicos, o condicionamento a que eram submetidos durante a transição física de um ponto para outro assim como o armazenamento nos momentos de repouso.

*“The excellent insulation and power rating of the kiln allowed a uniform temperature distribution throughout the inside firing load and, simultaneously, a firing cycles well-adjusted the ceramic paste.” (Cruz, 2019)*

A não existência de um cuidado rigoroso no tratamento dos produtos cerâmicos pode originar, como já presenciado no ACLab ilustrado na figura 3.8., o rebentamento dos corpos cerâmicos. Este exemplo pertence aos provetes sólidos extrudidos manualmente com as dimensões 30, 45 e 60 mm de diâmetro por 60, 90 e 120 mm de altura.





**FIG. 3.8.** Resultado de um processo pré-cozedura mal efetuado.  
(a) Provetes partidos durante a cozedura; (b) Resíduos dos provetes;

A tabela 3.5., mostra em ( $t^{\circ}\text{C}$ ) as temperaturas a aplicar sobre as séries de provetes de cada pasta, representada pelo código em (ePf), seguido da data de preparação (Pasta) com um tempo de repouso em dias ( $R_p$ ) antecedente à FA onde se iniciaram os primeiros registos (R1). Em (C1), estão contabilizados os dias de repouso com o devido condicionamento explicado no tópico condicionamento fase 1. As fases de registo e condicionamento seguintes, estão representados por tópicos no presente subcapítulo e referênciados na tabela 3.5. por (R2), (C2), (R3) e (C3) com o intervalo em dias e data de cada registo.

**TAB. 3.5.** Registo e condicionamento no espaço temporal.

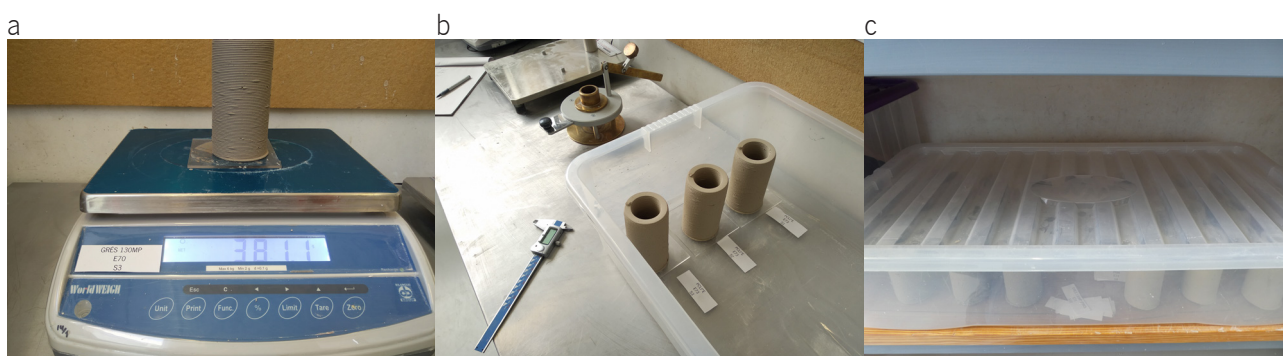
<i>t°C</i>	<i>ePf</i>	Pasta	<i>Rp</i>	<i>R1</i>	<i>C1</i>	<i>R2</i>	<i>C2</i>	<i>R3</i>	<i>C3</i>	Cozedura
700	E70	30-07-2019	1	31-07-2019	26	26-08-2019	1	27-08-2019	8	04-09-2019
900	E70	30-07-2019	1	31-07-2019	27	27-08-2019	1	28-08-2019	8	05-09-2019
1050	E70	30-07-2019	1	31-07-2019	28	28-08-2019	1	29-08-2019	8	06-09-2019
700	E72	01-08-2019	2	03-08-2019	23	26-08-2019	1	27-08-2019	8	04-09-2019
900	E72	01-08-2019	2	03-08-2019	24	27-08-2019	1	28-08-2019	8	05-09-2019
1050	E72	01-08-2019	2	03-08-2019	25	28-08-2019	1	29-08-2019	8	06-09-2019
700	E71	02-08-2019	3	05-08-2019	21	26-08-2019	1	27-08-2019	8	04-09-2019
900	E71	02-08-2019	3	05-08-2019	22	27-08-2019	1	28-08-2019	8	05-09-2019
1050	E71	02-08-2019	3	05-08-2019	23	28-08-2019	1	29-08-2019	8	06-09-2019
700	E74	05-08-2019	6	11-08-2019	15	26-08-2019	1	27-08-2019	8	04-09-2019
900	E74	05-08-2019	6	11-08-2019	16	27-08-2019	1	28-08-2019	8	05-09-2019
1050	E74	05-08-2019	6	11-08-2019	17	28-08-2019	1	29-08-2019	8	06-09-2019
700	E73	06-08-2019	7	13-08-2019	13	26-08-2019	1	27-08-2019	8	04-09-2019
900	E73	06-08-2019	7	13-08-2019	14	27-08-2019	1	28-08-2019	8	05-09-2019
1050	E73	06-08-2019	7	13-08-2019	15	28-08-2019	1	29-08-2019	8	06-09-2019
700	E76	07-08-2019	8	15-08-2019	11	26-08-2019	1	27-08-2019	8	04-09-2019
900	E76	07-08-2019	8	15-08-2019	12	27-08-2019	1	28-08-2019	8	05-09-2019
1050	E76	07-08-2019	8	15-08-2019	13	28-08-2019	1	29-08-2019	8	06-09-2019
700	E75	12-08-2019	3	15-08-2019	11	26-08-2019	1	27-08-2019	8	04-09-2019
900	E75	12-08-2019	3	15-08-2019	12	27-08-2019	1	28-08-2019	8	05-09-2019
1050	E75	12-08-2019	3	15-08-2019	13	28-08-2019	1	29-08-2019	8	06-09-2019
700	E77	13-08-2019	4	17-08-2019	9	26-08-2019	1	27-08-2019	8	04-09-2019
900	E77	13-08-2019	4	17-08-2019	10	27-08-2019	1	28-08-2019	8	05-09-2019
1050	E77	13-08-2019	4	17-08-2019	11	28-08-2019	1	29-08-2019	8	06-09-2019
700	E78	14-08-2019	1	15-08-2019	11	26-08-2019	1	27-08-2019	8	04-09-2019
900	E78	14-08-2019	1	15-08-2019	12	27-08-2019	1	28-08-2019	8	05-09-2019
1050	E78	14-08-2019	1	15-08-2019	13	28-08-2019	1	29-08-2019	8	06-09-2019
700	E79	16-08-2019	3	19-08-2019	7	26-08-2019	1	27-08-2019	8	04-09-2019
900	E79	16-08-2019	3	19-08-2019	8	27-08-2019	1	28-08-2019	8	05-09-2019
1050	E79	16-08-2019	3	19-08-2019	9	28-08-2019	1	29-08-2019	8	06-09-2019

## Registo Fase1

O registo de dados aplica-se em todos os provetes, com início no momento em que termina a extrusão, efetuando o registo do peso e dimensões do provete ainda fresco. A produção sobre uma placa de Polimetilmetacrilato (PMMA), permite a deslocação do provete para a balança sem que haja necessidade de tocar no perfil cerâmico. Desta forma, é possível a colocação de outra placa acrílica na plataforma do equipamento e iniciar a produção do próximo provete em paralelo com o registo das dimensões. É registada a altura do perfil tubular em dois pontos, o diâmetro exterior na parte inferior e superior assim como a medição da espessura em dois pontos do provete. Esta fase termina com a transição do provete para uma caixa de PP (Polipropileno) em estado de repouso.

## Condicionamento Fase1

Utilizaram-se duas caixas com as dimensões 18x40x70cm (AxLxP) para condicionamento dos corpos cerâmicos logo após o registo da primeira fase, com uma colocação ordenada na base da caixa acompanhados com a etiqueta anteriormente mencionada e ilustrada no subcapítulo 3.3. Procedimento da Fabricação Aditiva em Figura 3.5. Em cada uma das caixas, apenas cabem duas series de provetes correspondendo a dois tipos de pastas, obrigando à transição para espaço aberto reservado, mas sujeitos à temperatura ambiente da sala como se pode observar na figura 3.9.c). A figura 3.9.a) mostra o momento da pesagem e registo de cada provete, a figura 3.9.b) ilustra a disposição dos provetes na caixa de repouso.



**FIG. 3.9.** Registo e condicionamento.

(a) balança com o provete cru; (b) colocação dos provetes com auxílio de base em PMMA; (c) repouso antes de cura a temperatura ambiente em espaço aberto;

## Registos Fase2

Num processo idêntico ao da fase1 dos registos, após secagem em espaço aberto com temperatura ambiente, são registadas as dimensões pertinentes, o peso dos provetes e os dias de repouso, possibilitando já nesta fase obter resultados ao nível da retração.

## Condicionamento Fase2

Esta fase do condicionamento, foca-se na colocação dos provetes em placas refratárias no interior da estufa Memmert Universal Oven UFE 500, submetidos a uma temperatura de 110°C durante 24 horas extraindo a humidade existente à semelhança de um dos passos do método Pfefferkorn referido no subcapítulo 3.1. Aplicação do método Pfefferkorn. A figura 3.10. mostra os corpos cerâmicos no interior da estufa, correspondentes aos que estão destinados a

uma das três cozeduras planeadas de 700°C, o mesmo acontece a mais dois grupos de provetes para as temperaturas 900°C e 1050°C.



**FIG. 3.10.** Série de provetes na estufa a 110°C.

### **Registos Fase3**

Agrupados por temperaturas de cozedura, o registo é efetuado de igual forma, apenas com a alteração do dia de registo entre os provetes de cada pasta. Esta é a ultima fase de registo antes de irem para o forno cerâmico.

### **Condicionamento Fase3**

Para o condicionamento dos provetes após passagem pela estufa a 110°C, utilizou-se três caixas de PP seccionadas pelas temperaturas de cozedura 700°C, 900°C e 1050°C até a entrada no forno. O sentido de colocação dos provetes no seu interior foi rigoroso, pois, a ordem definida responsabiliza os registos efetuados desde a FA até os ensaios mecânicos. Na figura 3.11. pode-



se observar as caixas descritas com os perfis tubulares no seu interior.



**FIG. 3.11.** Caixas de condicionamento dos provetes até os ensaios mecânicos.

## 3.5. Cozedura

Para a cozedura, o ACLab dispõe de um forno elétrico, KILPER KILN EB220 – 1300°C, figura 3.12., com as dimensões 76x50x70 cm (AxLxP) e um excelente isolamento, permitindo uma distribuição da temperatura uniforme em toda a matéria no seu interior, contribuindo para um ciclo de cozedura bem ajustado à pasta em questão. O comando de interface digital acoplado garante um controlo preciso da temperatura ao longo do ciclo desejado, com a introdução dos parâmetros tempo, temperatura e estado da chaminé em cada passo do ciclo.



**FIG. 3.12.** Caixas de condicionamento dos provetes até os ensaios mecânicos.

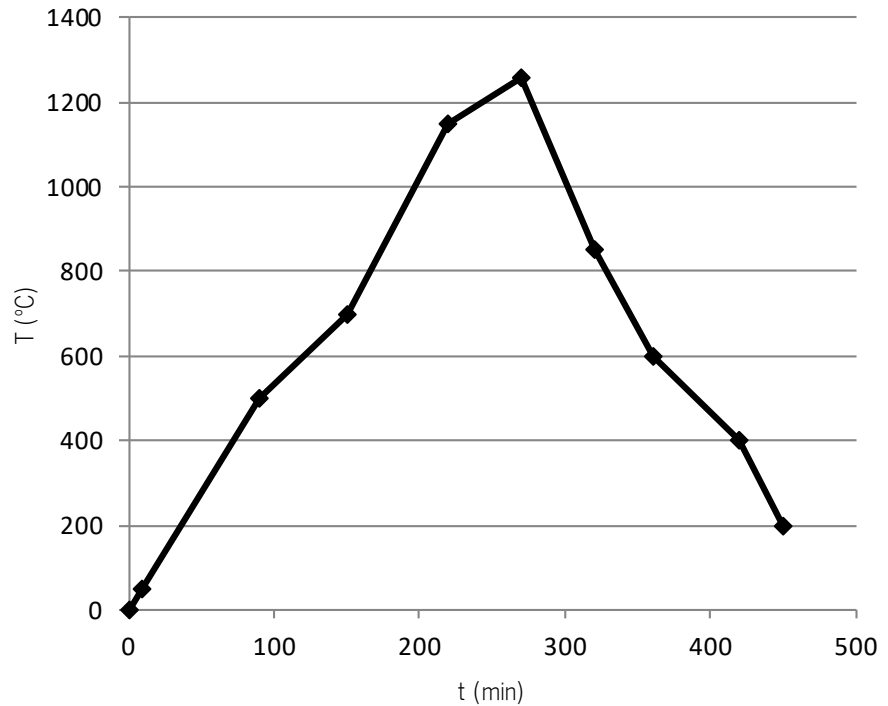
A curva base para a cozedura dos produtos desenvolvidos pela FA tem o limite de 1260°C com intervalos correspondentes a um determinado tempo versus temperatura versus estado da chaminé com ações entre fechada e aberta. A curva representada em forma de gráfico na Figura 3.13., define as movimentações da temperatura num espaço temporal enquanto que a tabela 3.6., em função do tempo em minutos, atribui uma temperatura a atingir até o início do próximo período temporal. A tabela 3.7., define o estado da porta se fechada ou aberta, tendo em conta o tempo associado. Este ciclo de cozedura é o mais usado no ACLab para a vitrificação dos produtos cerâmicos, um pouco diferente dos usados para o estado chacota e posterior vidragem.

**TAB. 3.6.** Relação entre tempo e temperatura (1260°C).

<b>t (min)</b>	<b>T (°C)</b>
0	0
9	50
90	500
150	700
220	1150
270	1260
320	850
360	600
420	400
450	200

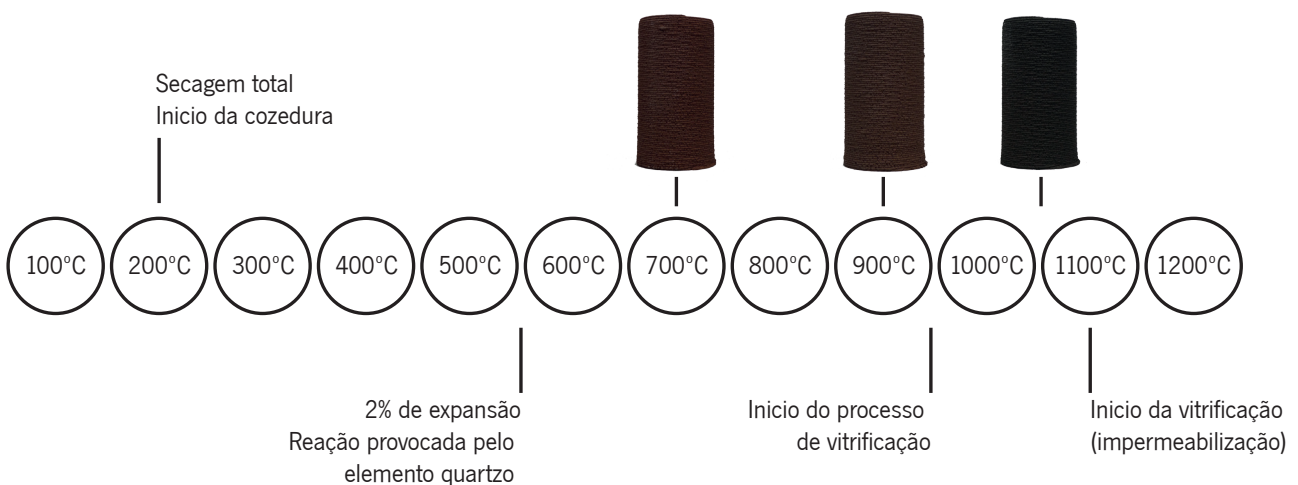
**TAB. 3.7.** Ação aberto ou fechado para porta e chaminé (1260°C).

<b>T (°C)</b>		<b>Porta forno</b>	<b>Chaminé</b>
0	50	Fechada	Aberta
Ciclo		Fechada	
400	200	Fechada	Aberta
200	100	Entreaberta	Fechada
100	Ambiente	Aberta	Fechada



**FIG. 3.13.** Curva de cozedura (1260°C).

A cozedura divide-se em várias fases caracterizadas pelas reações despoletadas pelo aumento da temperatura sobre o material cerâmico. No arranque inicial, a secagem total acontece aos 200°C, com o desaparecimento total da água incorporada nas superfícies da cerâmica, provocando uma pequena diminuição do volume e o aumento da porosidade. Aos 600°C, a ação do calor transforma irreversivelmente a natureza da argila com o endurecimento a partir dos 1000°C mantendo uma porosidade acentuada. A vitrificação, acontece a partir 1100°C e conseqüente perda de porosidade. A figura 3.14. mostra os acontecimentos ao longo do ciclo de cozedura.



**FIG. 3.14.** Fases da cozedura das pastas cerâmicas.

Neste subcapítulo são mencionadas várias curvas de cozedura criadas com patamares diferenciados entre si, desenvolvidas em função das várias fases apresentadas, possibilitando o estudo do impacto do comportamento mecânico dos provetes. O resultado serve como base para a atribuição do tipo de curva de cozedura, aos produtos desenvolvidos, relacionada com a carga mínima admissível para a sustentabilidade e funcionalidade do elemento ou estrutura cerâmica. Desta forma, é possível a diminuição do tempo de utilização do forno cerâmico assim como a energia elétrica necessária assumindo as características finais da argila obtidas nos diferentes ciclos de cozedura.

### **3.5.1.**

#### **Cozedura a 700°C**

O presente subcapítulo apresenta a proposta utilizada no ciclo de cozedura com patamar a 700°C, ilustrada pelas tabelas 3.8. e 3.9. representada no gráfico da figura 3.15. sobre os eixos  $T(^{\circ}\text{C})$  e  $t(\text{min})$ .

Recorrendo à figura 3.14., representada com as várias fases existentes no ciclo de cozedura dos materiais cerâmicos, o ciclo atual enquadra-se com os objetivos para a diminuição do tempo de cozedura desde o ponto a temperatura ambiente até o patamar, conseqüente diminuição da energia necessária até os 700°C e baixa percentagem de retração quando comparada com a temperatura de vitrificação. Sabendo das reações dos minerais inerentes às temperaturas atingidas em cada fase, entende-se que a partir dos 573°C exista uma variação rápida do volume, cerca de 2% de expansão, exigindo um tempo mais longo de cozedura até os 700°C. Assim que seja atingida a temperatura de patamar, esta é prolongada por mais 30 minutos dando início à fase de retorno para a temperatura ambiente sem que seja aplicada uma energia sobre as resistências do forno elétrico. Como se pode observar na tabela 3.9., na fase decrescente entre os 400°C e os 200°C a chaminé do forno recebe a ordem para o estado aberta terminando o ciclo a uma temperatura ambiente com chaminé fechada e porta aberta.

A baixa temperatura permite um melhor controlo da contração natural da argila, com resultados próximos entre a dimensões do modelo digital e a geometria do desenvolvido através da FA. A incorporação de materiais, que

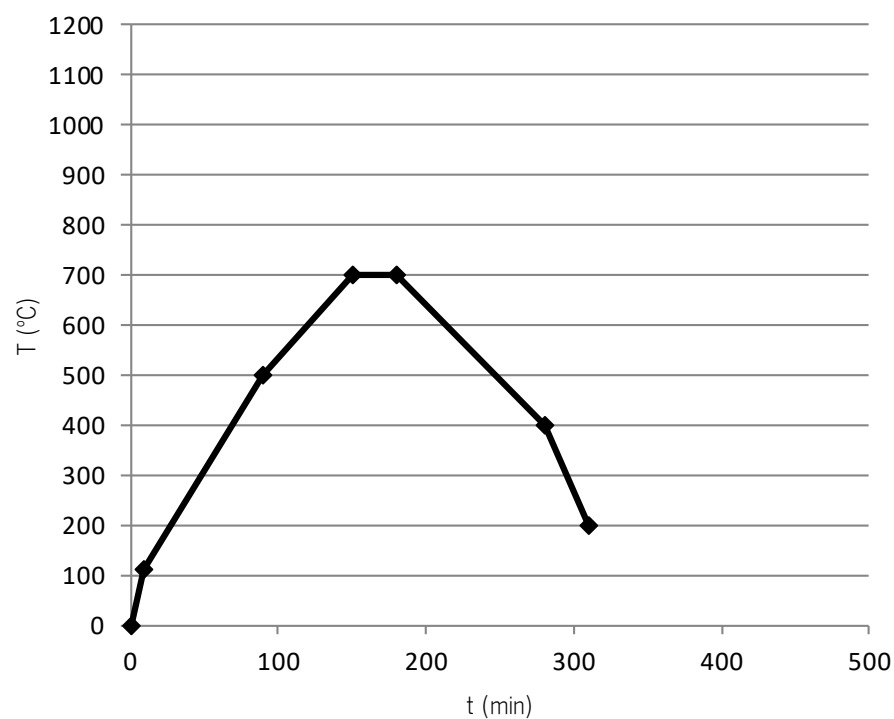
não sofram alterações físicas até os 700°C, torna-se possível durante a FA, à semelhança dos exemplos descritos no subcapítulo 2.2.4. Elementos de ligação capacitando a criação de novas formas de ligação entre os elementos cerâmicos.

**TAB. 3.8.** Relação entre tempo e temperatura (700°C).

t (min)	T (°C)
0	0
9	50
90	500
150	700
180	700
280	400
310	200

**TAB. 3.9.** Ação aberto ou fechado para porta e chaminé (700°C).

T (°C)		Porta forno	Chaminé
0	110	Fechada	Aberta
Ciclo		Fechada	
400	200	Fechada	Aberta
200	100	Entreaberta	Fechada
100	Ambiente	Aberta	Fechada



**FIG. 3.15.** Curva de cozadura (700°C).

### 3.5.2.

#### Cozedura a 900°C

A curva de cozedura utilizada para o patamar de 900°C, figura 3.16., difere apenas a partir do minuto 150 como se pode observar na comparação entre a tabela 3.10. e a tabela 3.11. O tempo de cozedura apresentado, é calculado com base na tabela 3.10., atribuindo ao minuto 180 o patamar de 900°C previsto no intervalo entre os 700°C e os 1150°C da curva de cozedura com patamar a 1260°C. A solução apresentada origina um ciclo de queima com um tempo de consumo de energia efetivo de 210 minutos, incluído os 30 minutos de patamar, com um total previsto de 340 minutos. O tempo de necessário para atingir os 900°C aumenta cerca de 30 minutos, em comparação com o ciclo de cozedura para os 700°C, criando uma diferença de 200°C do caso anterior.

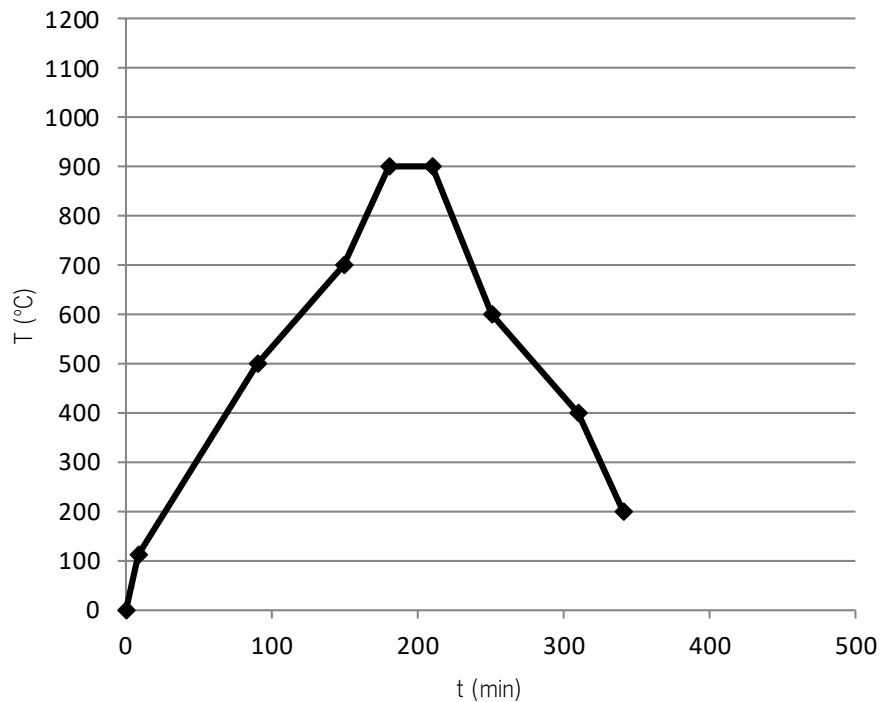
As reações da matéria cerâmica até os 900°C caracterizam-se pela secagem e perda de humidade, aumento da porosidade, expansão do volume de 2%, oxidação da matéria orgânica ainda existente na cerâmica e uma pequena percentagem de contração com diminuição da porosidade entre os 850°C e os 900°C. Esta última fase do ciclo pode oferecer características mecânicas superiores às que são obtidas até a temperatura de 700°C.

**TAB. 3.10.** Relação entre tempo e temperatura (900°C).

<b>t (min)</b>	<b>T (°C)</b>
0	0
9	50
90	500
150	700
180	900
210	900
250	600
310	400
340	200

**TAB. 3.11.** Ação aberto ou fechado para porta e chaminé (900°C).

<b>T (°C)</b>		<b>Porta forno</b>	<b>Chaminé</b>
0	110	Fechada	Aberta
Ciclo		Fechada	
400	200	Fechada	Aberta
200	100	Entreaberta	Fechada
100	Ambiente	Aberta	Fechada



**FIG. 3.16.** Curva de cozadura (900°C).

### 3.5.3. Cozedura a 1050°C

Neste subcapítulo, estão apresentados os vários passos na tabela 3.12. e tabela 3.13. para a definição da curva de cozadura para um patamar de 1050°C como mostra a figura 3.17. As suas principais diferenças comparando-as com os casos anteriores são o patamar e o tempo necessário para o atingir, obrigando a um maior consumo elétrico ainda assim inferior ao usado para atingir os 1260°C das cozaduras aplicadas no ACLab.

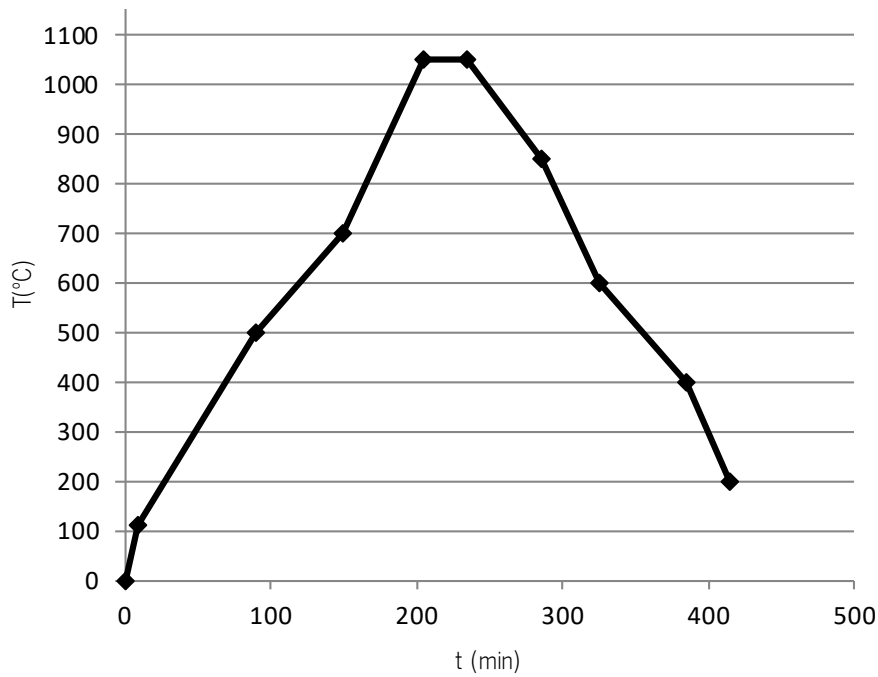
Com um tempo crescente de temperatura de 205 minutos e um total previsto de 415 minutos, interfere diretamente nas reações da cerâmica, passando pelas já mencionadas no subcapítulo 3.5.2. Cozedura a 900°C até a o início da vitrificação das pastas pelos reagentes feldspato e potássio. A cristalização da matéria cerâmica, com início aos 980°C, aumenta a resistência mecânica do corpo cerâmico possibilitando a aplicação desta curva de cozadura no desenvolvimento de elementos cerâmicos com capacidade estrutural sem que seja necessário atingir um patamar de 1260°C.

**TAB. 3.12.** Relação entre tempo e temperatura (1050°C).

t (min)	T (°C)
0	0
9	50
90	500
150	700
205	1050
235	1050
285	850
325	600
385	400
415	200

**TAB. 3.13.** Ação aberto ou fechado para porta e chaminé (1050°C).

T (°C)		Porta forno	Chaminé
0	110	Fechada	Aberta
Ciclo		Fechada	
400	200	Fechada	Aberta
200	100	Entreaberta	Fechada
100	Ambiente	Aberta	Fechada



**FIG. 3.17.** Curva de cozadura (1050°C).



## **3.6.**

# Resultados

O presente capítulo tem como objetivo a análise visual sobre os provetes após cozedura, partindo da comparação entre as pastas para as diferentes temperaturas aplicadas. No subcapítulo 3.6.1 Análise visual, são apresentadas figuras dos corpos cerâmicos cozidos a temperaturas máximas de 700°C, 900°C e 1050°C relativas às curvas de cozedura mencionadas no subcapítulo 3.5. Cozedura. Esta análise dá ênfase à comparação entre provetes da mesma pasta, de cada cozedura, análise da retração dos corpos cerâmicos comparando-os em altura e num modo geral as tonalidades obtidas em todos os casos. O registo de dados efetuado desde a FA, passando pelas várias fases de secagem e após cozedura, permite aferir percentagens de retração entre cada corpo cerâmico da cada pasta e de cada temperatura. Estes resultados são documentados no subcapítulo 3.6.2 Análise de Retração justificando parte do presente estudo com o enriquecimento da base de dados do Advanced Ceramics R&D Lab.

### **3.6.1.**

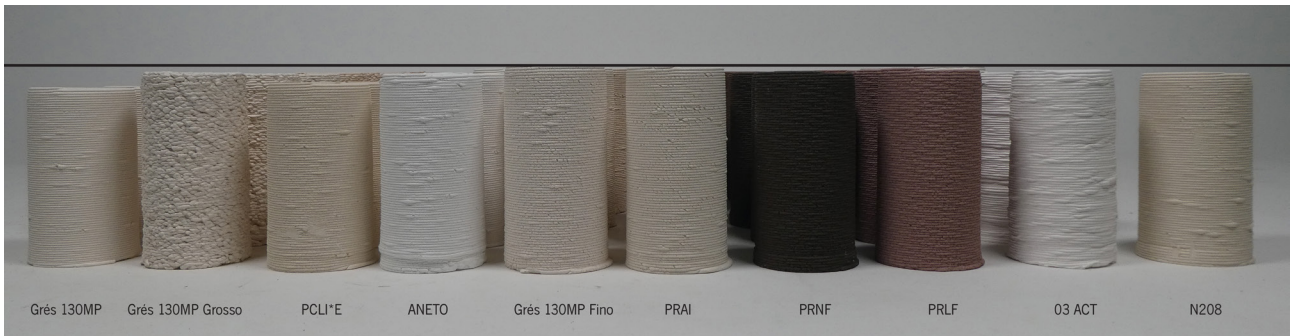
#### Análise visual

É pretendido com este subcapítulo, uma perceção visual particular dos provetes de cada pasta, que pelas características próprias de cada um, se pode associar a um caso específico em que prevalece a estética da superfície do produto com funcionalidades estruturais específicas, variando apenas o tipo de ciclo de cozedura aplicado. Quase, se pode assumir como um catálogo de cores (FIG.3.20.) a atribuir a uma estrutura composta por elementos únicos com tons diferenciados utilizando a mesma argila, mas com cozeduras distintas. A este panorama pode-se adicionar componentes cerâmicos desenvolvidos com diferentes pastas, desde que, haja uma proximidade das percentagens de retração entre elas a ponto de tornar possível a agregação geométrica à semelhança dos casos, mencionados anteriormente no subcapítulo 2.2.1. Aplicações, desenvolvidos no ACLab. Em todos os casos é perceptível uma tonalidade diferente em cada tipo de temperatura, em que apenas a pasta PRNF escurece com o aumento da queima, todas as outras ficam com um tom mais claro como se pode observar na figura 3.18.

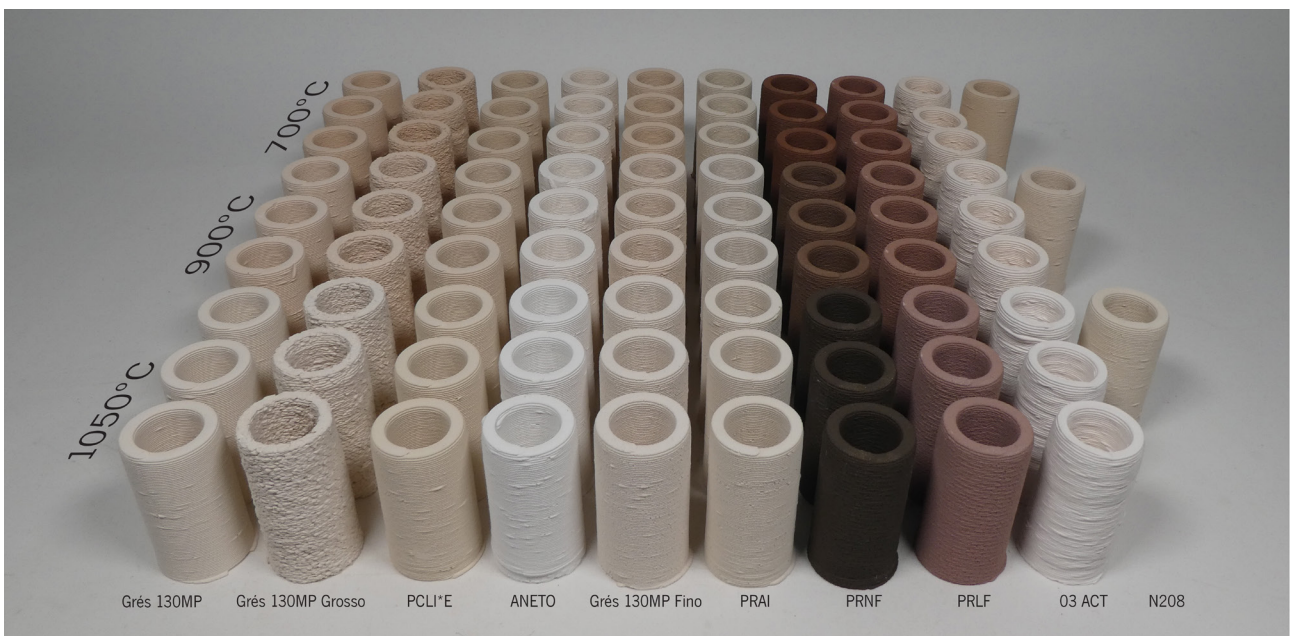


FIG. 3.18. Composição das diferentes temperaturas por pasta.

Visualmente, através da figura 3.19., podemos resumir que, as pastas Grés 130MP Fino, PRAI, PRLF e 03ACT estão com alturas muito próximas. Num segundo grupo estão as pastas N208, PRNF, o grés 130MP Grosso e Aneto com as pastas Grés 130MP e PCLI\*E no grupo das que mais retraíram. No próximo subcapítulo são apresentados todos os resultados obtidos relativos às retrações dos provetes das várias pastas estudadas.



**FIG. 3.19.** Percepção visual da retração com provetes alinhados.



**FIG. 3.20.** Conjunto total de provetes.



### 3.6.2.

#### Análise da retração

Os resultados da retração apresentados no presente subcapítulo, teve como suporte fulcral, o procedimento aplicado para registos e condicionamentos descritos no anterior subcapítulo 3.4. Pré-cozedura. À semelhança de acontecimentos anteriores a este estudo, o registo sobre os provetes cilíndricos para os ensaios mecânicos, é feito através da medição de vários pontos do corpo cerâmico, essencialmente na altura, diâmetro exterior e espessura da parede criada pela FA.

A análise de retração, incide na comparação de resultados entre as fases de registo que decorrem no processo de cura terminando no registo para as diferentes cozeduras. As retrações dão-se em todas as fases para cada tipo de material cerâmico, sendo que, em alguns dos casos, ainda que mínima, acontece o contrário como e pode observar nas tabelas 3.14., 3.15. e 3.16.

As dimensões atribuídas na modelação (MD), serviram como base de comparação com o primeiro momento de registo com a pasta ainda fresca logo após a FA, sendo este o ponto de início para a perceção da percentagem de retração efetiva até o registo (R3) como mostram as colunas (aR1vs aR3),(IR1 vs IR3) e (eR1 vs eR3). A comparação está feita da mesma forma para as diferentes temperaturas máximas atribuídas a cada curva de cozedura, representada pela percentagem de retração existente entre as dimensões do modelo digital e as dimensões finais, assim como, a confrontação de resultados entre o primeiro registo (R1) e o último registado após cozedura.

A tabela 3.14. apresenta os resultados obtidos através do registo sobre a altura de cada provete produzido pela FA. A designação atribuída a cada coluna resulta do cruzamento entre as dimensões iniciais do modelo e o momento do registo definidos. Para além da comparação entre os resultados obtidos em cada fase, podemos também fazer entre pastas, por exemplo, numa avaliação total entre o ciclo de cura e cozedura, a pasta Grés 130MP Fino, foi a que menos retraiu, com uma percentagem mínima pós cozedura de 4,76% entre as dimensões do modelo digital e as obtidas na curva de cozedura a 900°C (MD vs a900). Confrontando este resultado com o da pasta que é mais utilizada no ACLab, o grés 130MP, é perceptível a diferença de aproximadamente 7%, valor inferior aos 11,58% do intervalo entre o modelo

digital e temperatura 900°C (MD vs a900). Mediante resultados obtidos na medição da altura dos provetes apresentados, sobre o valor da média do conjunto de corpos cerâmicos de cada pasta, até o registo três (R3) do processo pré-cozedura, em que, a partir deste momento, são seccionados pelas diferentes temperaturas e calculados com médias entre si, é notória a baixa retração apresentada pelo grés 130MP Fino, PRAI, ANETO e O3ACT durante a fase da pré-cozedura. Destaca-se de igual forma na fase de pós-cozedura, o grés 130MP Fino, com uma retração de apenas 4,76% aos 900°C, em comparação com as dimensões do modelo digital e uma retração de cerca 6% a uma temperatura de 1050°C. Conclui-se que, desta forma é possível atenuar a diferença dimensional das formas geométricas digitais das produzidas em FA, facilitando o desenvolvimento de estruturas compostas por um conjunto de elementos cozidos a diferentes temperaturas.

**TAB. 3.14.** Análise da retração do provete, em altura, desde o modelo digital até à cozedura máxima de 1050°C.

<i>Pasta</i>	<i>MD vs aR1</i>	<i>aR1 vs aR3</i>	<i>MD vs aR3</i>	<i>MD vs a700</i>	<i>MD vs a900</i>	<i>MD vs a1050</i>	<i>aR1 vs a700</i>	<i>aR1 vs a900</i>	<i>aR1 vs a1050</i>	<i>a700 vs a1050</i>
Grés 130 MP	-0,66%	11,84%	11,34%	11,65%	11,58%	14,79%	12,06%	12,10%	15,35%	3,56%
GRÉS 130 MP Fino	-1,12%	5,78%	4,73%	4,85%	4,76%	4,85%	5,64%	5,97%	6,02%	0,00%
GRÉS 130 MP Grosso	-0,86%	7,44%	6,65%	7,28%	6,79%	7,34%	7,89%	7,73%	8,15%	0,07%
PCLI*E	-1,30%	11,15%	9,99%	10,14%	10,40%	12,70%	11,21%	11,55%	13,90%	2,84%
PRAI	-1,11%	5,66%	4,61%	4,69%	5,00%	6,42%	5,64%	6,05%	7,52%	1,81%
PRLF	-1,16%	8,16%	7,09%	7,53%	7,45%	8,06%	8,64%	8,55%	9,03%	0,58%
ANETO	-1,15%	5,85%	4,77%	5,21%	5,35%	8,28%	6,34%	6,43%	9,27%	3,24%
PRNF	-1,09%	8,43%	7,44%	7,87%	8,24%	9,08%	9,01%	9,22%	9,92%	1,32%
N208	-1,31%	10,01%	8,83%	8,53%	8,95%	10,95%	9,82%	9,87%	12,25%	2,66%
O3ACT	0,94%	4,52%	5,42%	6,94%	5,08%	9,87%	4,88%	5,10%	9,26%	3,15%

O diâmetro dos provetes cilíndricos é influenciado diretamente pelos parâmetros aplicados durante a FA conforme explicado no subcapítulo 3.3.2. Comportamento das argilas na Fabricação Aditiva, o que pode implicar uma maior variação das dimensões entre o diâmetro digital e o registado após FA. Na tabela 3.15., compreende-se a diferença mencionada em (MD vs IR1), com diâmetros até 7% superiores aos 60 mm definidos no modelo digital.

De certa forma, seguindo os parâmetros aplicados na FA com o intuito de melhorar a qualidade de extrusão de matérias viscosas em estudo, acabou por se tornar positivo refletindo os resultados de retração apresentados ao longo da pré e pós cozedura. O grés 130MP Fino teve uma retração inferior a todas as outras à temperatura máxima de 1050°C. É de salientar, a percentagem de retração praticamente nula entre as temperaturas a 700°C e 1050°C (1700°C

vs 11050°C), ainda que comparados com resultados obtidos através de séries diferentes de provetes, três em cada caso, possibilitando a criação de produtos com elementos cozidos pelos diferentes tipos de cozedura e consequente alteração da tonalidade utilizando a mesma pasta.

**TAB. 3.15.** Análise da retração do diâmetro do provete, desde o modelo digital até à cozedura máxima de 1050°C.

<i>Pasta</i>	<i>MD vs IR1</i>	<i>IR1 vs IR3</i>	<i>MD vs IR3</i>	<i>MD vs 1700</i>	<i>MD vs 1900</i>	<i>MD vs 11050</i>	<i>IR1 vs 1700</i>	<i>IR1 vs 1900</i>	<i>IR1 vs 11050</i>	<i>1700 vs 11050</i>
Grés 130 MP	-5,79%	8,80%	3,52%	3,04%	3,80%	5,77%	8,59%	8,72%	11,01%	2,81%
GRÉS 130 MP Fino	-5,64%	7,33%	2,10%	2,02%	1,87%	2,32%	7,59%	7,44%	6,86%	0,30%
GRÉS 130 MP Grosso	-5,23%	7,54%	2,71%	1,22%	2,35%	4,91%	7,17%	6,40%	9,39%	3,73%
PCLI*E	-6,03%	8,12%	2,58%	2,32%	2,40%	4,16%	7,91%	7,97%	9,55%	1,88%
PRAI	-3,62%	6,99%	3,62%	3,19%	3,88%	5,05%	7,07%	6,53%	8,57%	1,93%
PRLF	-6,04%	7,52%	1,93%	2,09%	3,14%	3,66%	7,82%	8,20%	9,45%	1,60%
ANETO	-5,64%	6,98%	1,73%	1,99%	2,41%	4,52%	7,66%	7,39%	9,41%	2,58%
PRNF	-6,71%	7,89%	1,71%	1,88%	2,55%	4,89%	8,08%	8,60%	10,91%	3,06%
N208	-7,22%	8,08%	1,44%	0,87%	0,96%	3,40%	7,08%	7,90%	10,10%	2,56%
O3ACT	-7,41%	8,19%	1,40%	1,59%	1,83%	5,80%	8,65%	7,00%	13,52%	4,27%

Utilizando os mesmos parâmetros e assumindo-os para a melhor qualidade de extrusão das pastas viscosas, reflete-se de igual forma com os resultados indicados na coluna (MD vs IR1) da tabela 3.16., quando comparamos os valores entre o modelo digital e os registos de cada momento, apresentando percentagens negativas com dimensões superiores às que foram projetadas.

**TAB. 3.16.** Análise da retração da espessura do provete, desde o modelo digital até à cozedura máxima de 1050°C.

<i>Pasta</i>	<i>MD vs eR1</i>	<i>eR1 vs eR3</i>	<i>MD vs eR3</i>	<i>MD vs e700</i>	<i>MD vs e900</i>	<i>MD vs e1050</i>	<i>eR1 vs e700</i>	<i>eR1 vs e900</i>	<i>eR1 vs e1050</i>	<i>e700 vs e1050</i>
Grés 130 MP	-55,08%	11,47%	-37,30%	-39,78%	-34,50%	-30,51%	10,56%	12,66%	15,78%	6,63%
GRÉS 130 MP Fino	-56,31%	9,43%	-41,56%	-41,62%	-40,84%	-39,72%	11,11%	10,57%	8,15%	1,35%
GRÉS 130 MP Grosso	-58,48%	9,03%	-44,17%	-51,95%	-45,84%	-35,24%	8,27%	8,46%	10,12%	11,00%
PCLI*E	-65,06%	11,69%	-45,76%	-47,31%	-45,36%	-40,77%	10,68%	13,31%	13,41%	4,44%
PRAI	-40,83%	9,16%	-27,93%	-29,82%	-25,99%	-23,78%	9,20%	9,26%	12,01%	4,65%
PRLF	-59,92%	10,79%	-42,66%	-43,14%	-38,61%	-39,53%	13,90%	11,05%	11,50%	2,52%
ANETO	-58,97%	9,94%	-43,17%	-44,58%	-39,78%	-40,27%	10,28%	10,24%	12,34%	2,99%
PRNF	-63,36%	10,76%	-45,79%	-43,76%	-44,58%	-41,64%	12,81%	10,13%	13,80%	1,47%
N208	-71,72%	12,81%	-49,72%	-49,38%	-49,79%	-45,59%	14,61%	12,30%	14,07%	2,54%
O3ACT	-62,81%	7,86%	-50,01%	-51,72%	-51,24%	-40,63%	8,74%	9,65%	9,14%	7,31%

Em algumas das matérias cerâmicas, as percentagens de retração são muito próximas entre os diferentes ciclos de cozedura representadas nas colunas (eR1 vs e700), (eR1 vs e900), (eR3 vs e1050), com base nas dimensões dos provetes de cada série. No entanto, quando comparados com o modelo digital, a diferença de retração entre os ciclos de cozedura, reflete-se no resultado obtido na coluna (e700 vs e1050).

Posto isto, depois de se aferir os resultados apresentados através das medições sobre a parede dos perfis cilíndricos, entendemos que o grés 130MP Fino, foi a que menos retraiu, ao longo dos ciclos de cozedura sendo a O3ACT com menor retração no processo pré-cozedura.

## 4.

# Ensaaios mecânicos

O presente capítulo, visa expor o processo para a caracterização do comportamento mecânico dos diferentes materiais cerâmicos sobre os provetes cilíndricos cozidos a diferentes temperaturas, assim como, a análise e apresentação em tabelas e gráficos dos resultados obtidos através dos ensaios realizados à compressão.

A caracterização mecânica dos elementos cerâmicos, pode influenciar a seleção do material cerâmico para o desenvolvimento de aplicações arquitetónicas semelhantes às descritas no capítulo 2.2.1 Aplicações. Ainda que, adotadas como protótipos, é de salientar a capacidade de se replicarem para implementação em casos reais, fortalecendo a importância da perceção da resistência mecânica do material cerâmico.

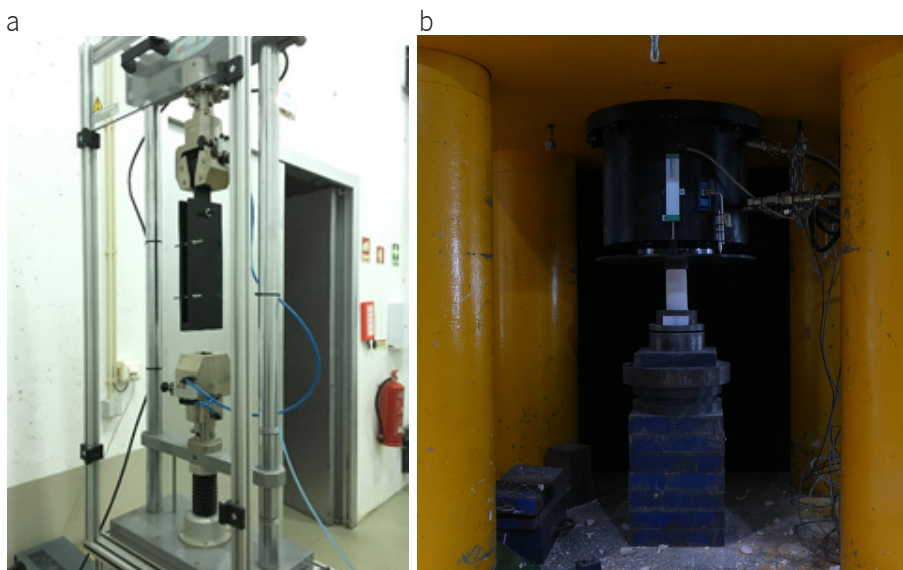
### 4.1.

## Procedimento

O procedimento criado para os ensaios mecânicos à compressão, inicia após a cozedura dos corpos cerâmicos, que, como é explicado no subcapítulo 3.4.

Pré-cozedura, é necessário um bom condicionamento desde a primeira fase de cura até ao momento do ensaio mecânico. Cada um deles, fez-se acompanhar pelos indicadores de papel com as respetivas referências organizadas pelo tipo de pasta, serie e temperatura máxima de cada ciclo de cozedura.

Numa fase inicial, já nas instalações do Laboratório de Construção e Tecnologia da Universidade do Minho (LCT), procedeu-se aos ensaios de teste sobre provetes cozidos a 700°C, com recurso ao equipamento da Microtest® SCM3000 com capacidade de carga máxima de 50kN, figura 4.1.a). Preparado o ambiente de trabalho, com o ajuste do pórtico superior da amarra do equipamento até a colocação de uma cartolina negra, para melhorar a captação de imagens e os vídeos dos testes, pôde-se dar inicio aos ensaios de compressão dos provetes cozidos a 700°C. Sabendo que, os valores máximos atingidos em alguns dos provetes se aproximavam do admissível pelo equipamento Microtest® SCM3000, optamos por realizar os restantes ensaios utilizando o equipamento E8, figura 4.1.b), com capacidade máxima de 1800kN alocado no Laboratório de Estruturas da Universidade do Minho (LEST). A figura 4.2. mostra um provete de cada pasta cerâmica, colocados no equipamento E8, fotografados no momento imediato após a rotura, onde foram ensaiados todos os provetes cozidos a 900°C e a 1050°C. Os resultados obtidos estão representados no próximo subcapítulo 4.2. Comportamento mecânico em tabelas e gráficos editados com base nos registos criados durante os ensaios à compressão.



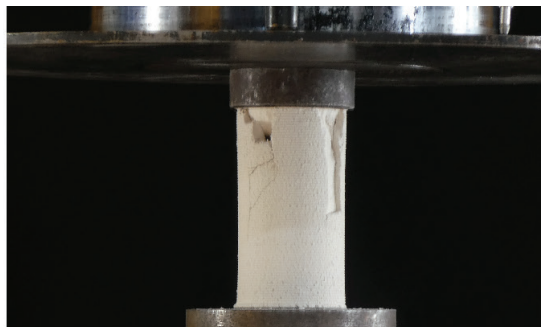
**FIG. 4.1.** Equipamento para caracterização do comportamento mecânico.  
(a) Microtest® SCM3000, carga máxima de 50kN; (b) E8, carga máxima de 1800kN;



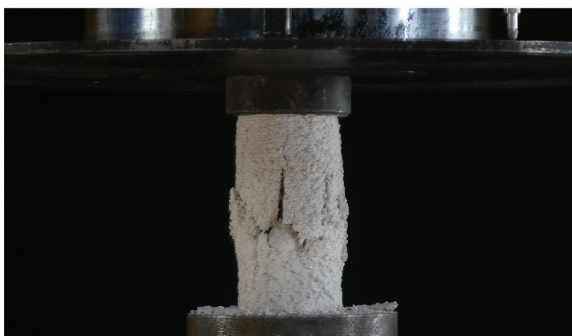
Grés 130MP



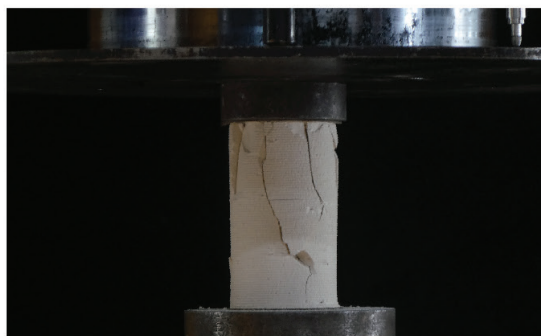
Grés 130MP Fino



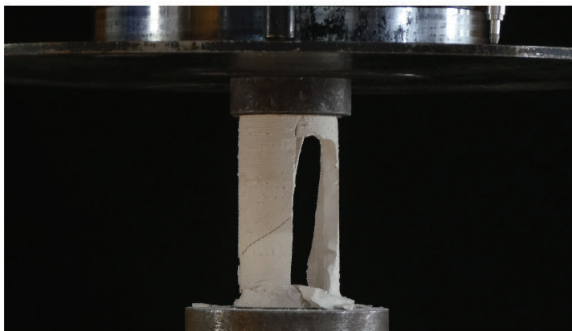
Grés 130MP Grosso



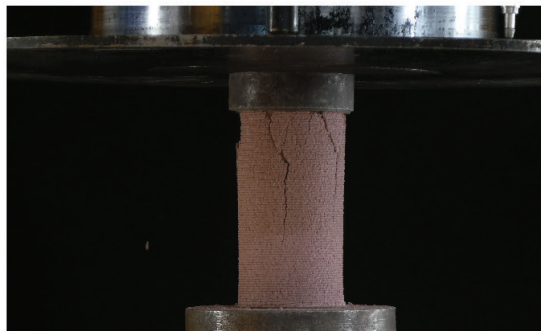
PCLI\*E



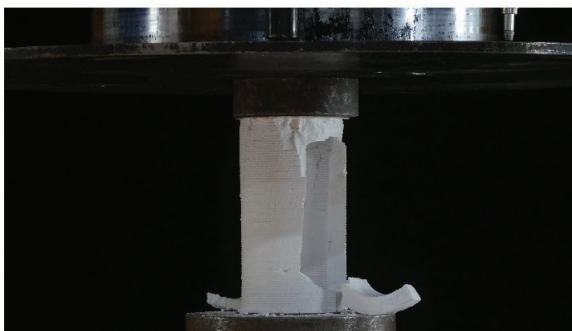
PRAI



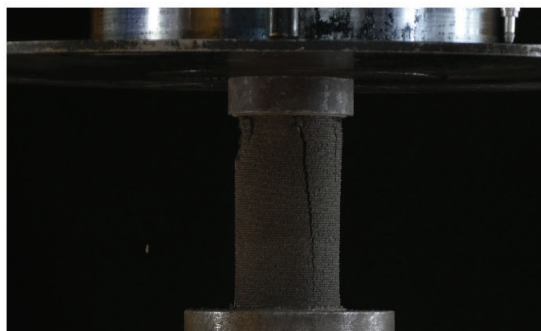
PRLF



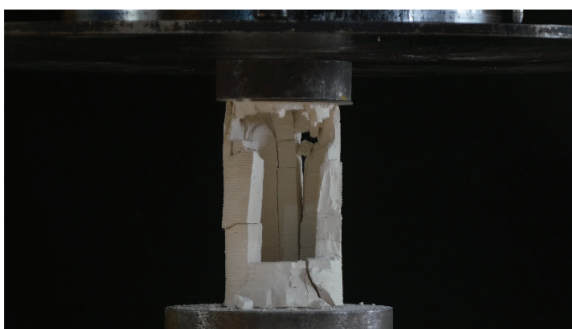
ANETO



PRNF



N208



03 ACT



FIG. 4.2. Ilustrações dos provetes após rotura, colocados no equipamento E8 do LEST.

## 4.2. Comportamento mecânico

Os resultados dos cálculos sobre os ensaios à compressão apresentados na tabela 4.1. e figura 4.3., baseiam-se na relação entre a área (mm<sup>2</sup>) correspondente a cada perfil cilíndrico e a força máxima exercida até o ponto de rotura. Os valores representam a média da carga máxima atingida em cada provete, pertencente à série de ensaios seccionados pelo tipo de material cerâmico e curva de cozedura. Numa análise de comparação entre as pastas cerâmicas utilizadas para o estudo, cozidos a uma temperatura máxima de 700°C, destaca-se a diferença entre a matéria O3ACT com uma média de 2,16 MPa e o grés 130MP com resultados próximos dos 10,32 MPa diferenciando-se em cerca de 100 mm<sup>2</sup> na área média das respetivas séries, tabela 4.1. Com exceção no grés 130MP Grosso, todas as outras pastas tiveram comportamentos mecânicos à compressão ascendentes à medida que a temperatura máxima de cozedura aumentava, ainda que em análise, se entenda que as pastas PRLF, PRNF e o próprio grés 130MP Grosso tenham resultados muito próximos entre as temperaturas 900°C e 1050°C. De referir, que a força máxima exercida á compressão, sobe com o aumento da temperatura, como se observa na figura 4.4., e conseqüente redução da área de contacto dos provetes com resultados a rondar os 5 MPa para os provetes cozidos a 700°C, 18 MPa a 900°C e 38 MPa a 1050°C.

**TAB. 4.1.** Média dos resultados sobre o comportamento mecânico de cada material cerâmico.

Pasta	700°C	900°C	1050°C	700°C	900°C	1050°C
	$\sigma$ (MPa)			A (mm <sup>2</sup> )		
Grés 130 MP	10,32	23,40	54,80	1531,24	1471,10	1400,96
GRÉS 130 MP Fino	5,55	19,19	33,04	1566,70	1562,93	1544,40
GRÉS 130 MP Grosso	3,53	11,08	10,89	1671,68	1596,79	1457,02
PCLI*E	3,96	20,57	55,75	1609,80	1591,68	1518,18
PRAI	3,90	22,76	63,85	1440,90	1394,37	1354,69
PRLF	5,81	17,36	18,78	1578,62	1519,10	1517,23
ANETO	4,86	17,73	42,84	1593,14	1543,24	1507,03
PRNF	4,95	17,97	19,28	1588,02	1582,04	1511,44
N208	6,01	25,68	59,48	1657,02	1658,70	1573,66
O3ACT	2,16	9,30	32,58	1662,00	1653,10	1485,42

Como se pode observar na figura 4.3., a pasta PRAI, argila refratária com uma textura expressiva devido aos 40% de chamote, como referido no subcapítulo 2.3. Argilas, foi a que apresentou maior tensão média com cerca de 64 MPa numa área inferior à dos restantes provetes.

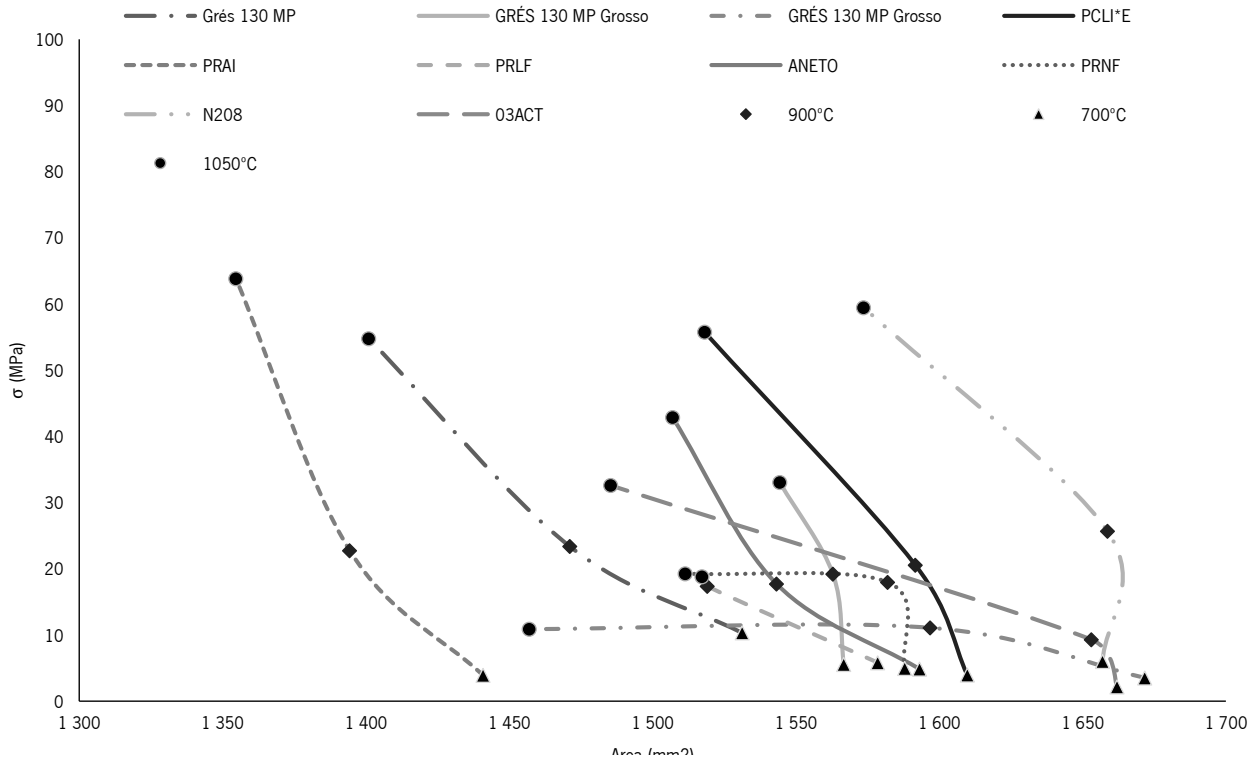
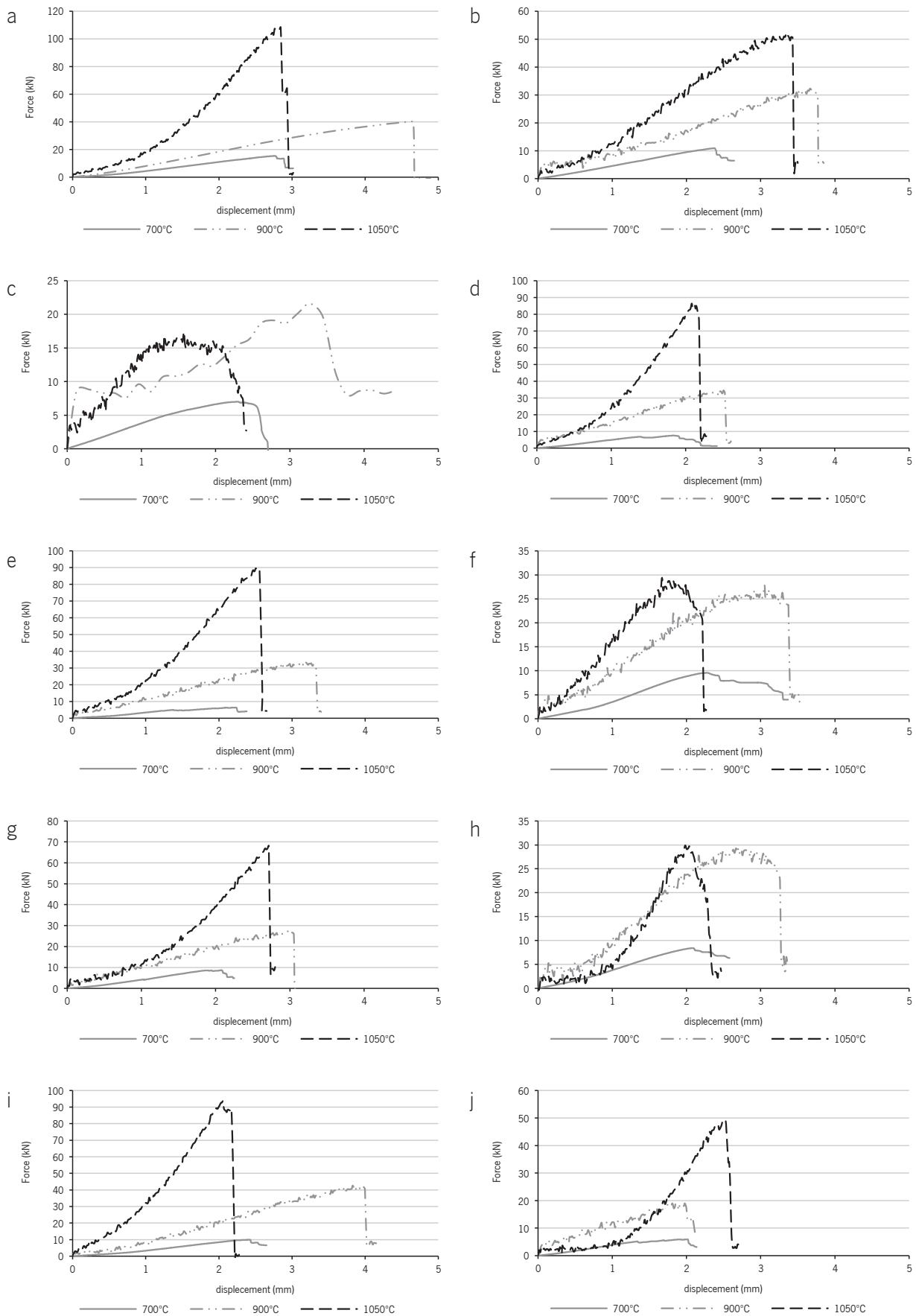


FIG. 4.3. Gráfico com a comparação das pastas face à tensão e área dos provetes.

As pastas PRNF e PRLF consideradas refratárias, à semelhança da PRAI, são o oposto quando se trata da capacidade de resistência das forças exercidas à compressão, possivelmente influenciada pela composição de 40% de grão chamotado com cerca de 0,5 mm de diâmetro. Acontece o mesmo com a pasta Grés 130MP Grosso (TAB.4.1.), também ela composta por chamote com diâmetro próximo de 2 mm, como já descrito no subcapítulo anterior 2.3. Argilas.



**FIG. 4.4.** Gráficos correspondentes ao comportamento mecânico de cada pasta.  
 (a) 130MP; (b) 130MP FINO; (c) 130MP GROSSO; (d) PCL1\*E; (e) PRAI; (f) PRLF; (g) ANETO; (h) PRNF; (i) N208; (j) O3ACT;

# 5.

## Conclusão

O presente capítulo demonstra os resultados mais relevantes desta investigação, mostrando os principais resultados das retrações e comportamentos mecânicos para cada argila a diferentes curvas de cozedura. O estudo centrou-se também, na definição do melhor procedimento de preparação da pasta cerâmica para o processo por FA.

### 5.1.

#### Considerações finais

Do estudo realizado ao longo desta investigação foi possível concluir que, atualmente, verifica-se uma crescente integração dos processos de FA para a produção de estruturas arquitetónicas com recurso a material cerâmico, exigindo o conhecimento das propriedades das argilas nas diversas fases de processamento.

Cada uma das pastas propostas foi submetida ao método Pfefferkorn para aferição do melhor índice de plasticidade, com o objetivo de otimizar a pasta cerâmica para o processo de extrusão para a FA. Para as diversas pastas obtiveram-se diferentes índices de plasticidade situados entre os 27% e os 36%. O grés 130MP e o grés PCL1\*E necessitam de uma percentagem de humidade superior a todas as outras matérias para atingirem o melhor IP do método Pfefferkorn.

A possibilidade de calcular a percentagem de humidade de uma argila, através da altura obtida após a queda do prato do plasticímetro utilizado no método Pfefferkorn. Este cálculo só é possível, desde de que, o método de Pfefferkorn tenha sido realizado sobre a pasta em questão.

Durante o processo de pré cozedura, foram aplicadas regras para o condicionamento dos provetes cerâmicos com o maior rigor possível. O intuito foi evitar estrangulamentos durante a cozedura à semelhança do que aconteceu em situação anteriores como mostra a FIG. 3.8. Os registos efetuados em todas as fases, permitiram um estudo coeso na análise dos seus resultados, tendo em conta ao número de exemplares ensaiados.

As pastas cerâmicas 130MP Grosso, PRLF e PRNF, caracterizadas pela percentagem de chamote em cerca de 40% com um granulado entre os 0,5 e os 2 milímetros, representam uma retração aproximada na pré-cozedura e entre as diferentes temperaturas de cozedura (8% a 9%). As semelhanças entre estas pastas, encontram-se também na análise do comportamento mecânico, principalmente nos resultados obtidos entre as temperaturas 900°C e 1050°C.

Em todas as pastas deram-se alterações de tonalidade correspondente a cada tipo de curva de cozedura. Este acontecimento, atribui a cada pasta três tons distintos completando um catálogo composto por trinta cores.

A pasta PRAI, em comparação com todas as outras e assumindo as três curvas de cozedura, foi a que teve maior resultado médio com 64 MPa, no entanto a pasta 130MP, a mais utilizada no ACLab, foi a que teve obteve maior tensão até a rotura com 78 MPa. Os resultados detalhados estão apresentados no Anexo 12.

## 5.2.

### Trabalhos futuros

A criação de uma relação entre os vários níveis de tensão existente entre as pastas em função da temperatura aplicada. A associação da retração nos diferentes tipos de cozedura, pode influenciar o desenvolvimento de uma estrutura composta por diferentes pastas cerâmicas oferecendo tonalidade e contrastes superficiais completamente distintas. Essa relação deve ser controlada, de forma a que a simbiose entre os elementos cerâmicos seja a mais adequada possível.

Estudo sobre o consumo energético do forno elétrico, nas diferentes curvas de cozedura, recorrendo a um dispositivo de comutação para registo de valores e posterior análise.

Aferição da retração a diferentes temperaturas para o mesmo provete com um patamar máximo 1260°C à semelhança do que habitualmente se coze no ACLab.

Caracterização do comportamento mecânico das pastas cerâmicas utilizadas no presente estudo a um patamar máximo de 1260°C.

Execução de ensaios dilatométricos para cada uma das pastas sobre amostras cruas e cozidas. Estes testes permitem a comparação dos resultados obtidos no processo de cura e cozedura com os que podemos obter através da dilatometria.

Pretende-se caracterizar o comportamento térmico de cada pasta, através da Análise Térmica Diferencial (ATD) e Análise Termo gravimétrica (ATG).

Investigação e testes sobre a agregação de elementos de diferentes materiais, capazes de resistirem às temperaturas aplicadas durante a cozedura, possibilitando a criação de novas formas de ligação entre as várias formas geométricas. Estes resultados dependem do comportamento mecânico da pasta cerâmica a agregar aos diferentes tipos de material.

# 6.

## Bibliografia

Andrade, F.A., Al-Qureshi, H.A. and Hotza, D. (2011). Measuring the plasticity of clays: A review. *Applied Clay Science*, Vol 51, pp. 1-7. Elsevier.

Arsenovic, M., Lalic, Z., Radojevic, Z., "Clay brick walls thermal properties," *International Journal of Modern Manufacturing Technologies*, Vol.2, pp. 15-18, May 2010.

Bechthold, M., Kane, A.O. and King, N., *Ceramic Material Systems: In Architecture and Interior Design*, Basel: Birkhäuser, 2015.

Campos, T., "Exploração da utilização de pasta de papel na fabricação aditiva em Arquitetura", Dissertação de mestrado, Universidade do Minho, Guimarães, 2019.

Canotilho, M., *Processos de cozedura em cerâmica*. Bragança: Instituto Politécnico de Bragança, 1999.

Carvalho, J., "Cerâmica 3D: Sistemas digitais para a personalização do desenho e fabrico de componentes arquitetónicos", Dissertação de mestrado, Universidade do Minho, Guimarães, Portugal.

Cruz, P.J.S., Figueiredo, B., J. Moreira, L. Ferreira, Sampaio, A.M., Pontes, A.J., "Self-supporting ceramic wall system: challenges of additive manufacturing of architectural ceramic components," *International Conference Structures and Architecture (ICSA2019)*, julho 24-26, Lisboa, 2019.

Cruz, P.J.S., Camões, A., Figueiredo, B., Renault, J. and Ribeiro, M. (2019). Additive manufacturing effect on the mechanical behaviour of architectural



stoneware bricks. *Construction & Building Materials*, Vol 238. Elsevier.

Cruz, P.J.S., Knaack, U., Figueiredo, B. and Witte, D.D., "Ceramic 3D printing – The future of brick architecture," *Proceedings of the IASS 2017 - Interfaces: Architecture, Engineering, Science*. HafenCity University, Hamburg, Germany, September 25-28, 2017.

Fadhel, N. F., Crowder, R. M., & Wills, G. B. (2015). Provenance in the additive manufacturing process. *IFAC-PapersOnLine*, 48 (3), pp. 2345–2350. Elsevier.

General Assembly United Nations. (2015, Sep.). Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development, United Nations, New York. <https://sustainabledevelopment.un.org/post2015/summit>

Guessasma, S., Zhang, W., Zhu, J., Belhabib, S., & Nouri, H. (2015). Challenges of additive manufacturing technologies from an optimisation perspective. *International Journal for Simulation and Multidisciplinary Design Optimization*, 6(A9), pp. 1–13. Elsevier.

Hauschild, M., Rudiger, K. (2011). *Digital Processes: Planning Design Production*. 1st ed. Munich: Edition Detail.

Kessling, O., Neff M. (2014). Layered Functional Parts on an Industrial Scale - Arburg Plastic Freeforming Permits Additive Manufacturing from Standard Granulate. *Kunststoffe international 2014/08*, pp. 40-43.

Moreira, J., "Fabrico Aditivo Cerâmico em Arquitetura: Metodologia Computacional para Definição de um Sistema de Colunas", Dissertação de mestrado, Universidade do Minho, Guimarães, 2018.

Pfefferkorn, K., 1924. *Ein Beitrag zur Bestimmung der Plastizität in Tonen und Kaolinen*. *Sprechsaal* 57 (25), 297–299.

Sampaio, Á. M., Gonçalves, R., Lima, A., Cruz, P.J.S., Figueiredo, B., Carvalho, S., Pontes, A. J., "Design for Additive Manufacturing of Mechanical Connections Toward Hybrid Products," *Proceedings of the AHFE 2019 International Conference on Additive Manufacturing, Modeling Systems and 3D Prototyping*, July 24–28, 2019.

Santoro, F., Fróis, V., *Telheiro da Encosta do Castelo*. Montemor-o-Novo: Oficinas do Convento, 2013.

Toretti, I, Bergmann, N., Benincá, A., Rezin, K. and Cargin, M., “Estudo da determinação da plasticidade de matérias-primas cerâmicas utilizando o método de Pfefferkorn,” *1º Simpósio de Integração Científica e Tecnológica do sul Catarinense - SICT -SUL*, 2012.

Towner, G. D., “The mechanics of cracking of drying clay,” *Journal of Agricultural Engineering Research*, 36.2, pp. 115-124, 1987.

Warnier, C. and Verbruggen, D., *Printing Things: Visions and Essentials for 3D Printing*. Berlin: Gestalten, 2014.

Wong, K. V. and Hernandez, A, “A Review of Additive Manufacturing,” *ISRN Mechanical Engineering*, Vol 2012, June 2012.

# 7.

## Anexos



Modelo digital				Fabrico Aditivo (±27°C)				Temperatura ambiente (±27°C)				Estufa (110°C)				Forno (700°C, 900°C, 1050°C)					
ePf	mm altura	mm largura	mm espessura	mm altura	mm largura	mm espessura	g peso	mm altura	mm largura	mm espessura	g peso	mm altura	mm largura	mm espessura	g peso	mm altura	mm largura	mm espessura	g peso		
E70	120	60	7,26	120,67	63,97	10,85	393,80	106,76	58,54	10,55	293,30	106,34	58,45	10,26	288,20	106,17	58,38	10,47	274,70		
E70	120	60	7,26	120,76	63,71	11,59	376,20	106,96	58,03	10,18	283,60	106,51	57,64	10,12	278,50	105,97	58,10	9,96	265,40		
E70	120	60	7,26	120,23	63,25	11,60	381,10	106,54	58,08	10,01	286,70	106,25	58,02	10,11	281,80	105,92	58,06	10,02	268,70		
			<i>média</i>	120,55	63,64	11,35	383,70	106,75	58,22	10,25	287,87	106,36	58,04	10,16	282,83	106,02	58,18	10,15	269,60		
			<i>dif_fases</i>	diferença por fases				13,80	5,43	1,10	95,83	0,39	0,18	0,09	5,03	0,34	-0,14	0,01	13,23	700	
			<i>% fases</i>	percentagem da diferença entre fases				11,45%	8,53%	9,69%	24,98%	0,37%	0,31%	0,85%	1,75%	0,32%	-0,24%	0,11%	4,68%		
			<i>dif_total</i>	diferença total entre a o estado de impressão e pós cozedura												14,53	5,47	1,20	114,10		
			<i>% total</i>	percentagem de retração a partir da impressão												12,1%	8,6%	10,6%	29,7%		
			<i>% total</i>	percentagem de retração a partir do projetado no modelo digital												11,7%	3,0%	-39,8%			
E70	120	60	7,26	120,71	63,39	11,56	370,60	107,70	58,56	9,98	278,90	107,06	57,92	9,72	273,90	106,28	57,68	9,81	263,30		
E70	120	60	7,26	121,01	63,02	11,01	376,40	107,31	58,06	9,74	283,10	106,75	57,40	9,98	278,10	106,19	57,55	9,70	259,40		
E70	120	60	7,26	120,42	63,29	10,97	377,10	106,81	57,92	9,95	281,50	106,11	57,98	9,78	276,50	105,84	57,94	9,80	261,70		
			<i>média</i>	120,71	63,23	11,18	374,70	107,27	58,18	9,89	281,17	106,64	57,76	9,82	276,17	106,10	57,72	9,77	261,47		
			<i>dif_fases</i>	diferença por fases				13,44	5,05	1,29	93,53	0,63	0,42	0,07	5,00	0,54	0,04	0,06	14,70	900	
			<i>% fases</i>	percentagem da diferença entre fases				11,13%	7,99%	11,54%	24,96%	0,59%	0,72%	0,69%	1,78%	0,50%	0,08%	0,58%	5,32%		
			<i>dif_total</i>	diferença total entre a o estado de impressão e pós cozedura												14,61	5,51	1,42	113,23		
			<i>% total</i>	percentagem de retração a partir da impressão												12,1%	8,7%	12,7%	30,2%		
			<i>% total</i>	percentagem de retração a partir do projetado no modelo digital												11,6%	3,8%	-34,5%			
E70	120	60	7,26	120,59	63,41	11,02	377,90	106,90	57,86	10,05	284,40	106,15	57,85	10,06	279,90	102,05	56,57	9,48	263,40		
E70	120	60	7,26	120,82	63,75	11,48	380,70	106,61	58,00	9,85	285,50	106,36	57,87	9,77	279,20	102,27	56,41	9,39	262,80		
E70	120	60	7,26	120,96	63,45	11,25	382,10	106,50	57,97	9,75	284,90	106,06	57,87	9,94	280,40	102,43	56,65	9,56	263,90		
			<i>média</i>	120,79	63,54	11,25	380,23	106,67	57,94	9,88	284,93	106,19	57,86	9,92	279,83	102,25	56,54	9,48	263,37		
			<i>dif_fases</i>	diferença por fases				14,12	5,59	1,37	95,30	0,48	0,08	-0,04	5,10	3,94	1,32	0,45	16,47	1050	
			<i>% fases</i>	percentagem da diferença entre fases				11,69%	8,80%	12,15%	25,06%	0,45%	0,14%	-0,39%	1,79%	3,71%	2,28%	4,50%	5,88%		
			<i>dif_total</i>	diferença total entre a o estado de impressão e pós cozedura												18,54	7,00	1,78	116,87		
			<i>% total</i>	percentagem de retração a partir da impressão												15,4%	11,0%	15,8%	30,7%		
			<i>% total</i>	percentagem de retração a partir do projetado no modelo digital												14,8%	5,8%	-30,5%			
			<i>média</i>	120,69	63,47	11,26	379,54	106,90	58,11	10,01	284,66	106,40	57,89	9,97	279,61						
			<i>dif_fases</i>	diferença por fases				13,79	5,36	1,25	94,89	0,50	0,23	0,04	5,04						
			<i>% fases</i>	percentagem da diferença entre fases				11,42%	8,44%	11,12%	25,00%	0,47%	0,39%	0,39%	1,77%						
			<i>dif_total</i>	diferença total entre a o estado de impressão e a estufa								14,29	5,59	1,29	99,93						
			<i>% total</i>	percentagem de retração a partir da impressão								11,8%	8,8%	11,5%	26,3%						
			<i>% total</i>	percentagem de retração a partir do projetado no modelo digital								11%	4%	-37%							

**Anexo 1.** Grés 130MP.

Modelo digital				Fabrico Aditivo (±27°C)				Temperatura ambiente (±27°C)				Estufa (110°C)				Forno (700°C, 900°C, 1050°C)				
ePf	mm altura	mm largura	mm espessura	mm altura	mm largura	mm espessura	g peso	mm altura	mm largura	mm espessura	g peso	mm altura	mm largura	mm espessura	g peso	mm altura	mm largura	mm espessura	g peso	
E71	120	60	7,26	121,11	63,86	11,77	418,10	113,97	59,01	10,73	334,00	114,38	58,49	10,69	330,20	113,86	58,79	10,35	319,00	
E71	120	60	7,26	120,87	63,41	11,11	411,40	114,57	59,10	10,22	328,40	114,51	58,57	10,53	324,60	114,29	58,68	10,10	313,80	
E71	120	60	7,26	121,00	63,58	11,82	411,20	115,00	59,25	10,48	328,40	114,15	58,78	10,31	324,70	114,38	58,89	10,40	313,90	
			<i>média</i>	120,99	63,62	11,57	413,57	114,51	59,12	10,48	330,27	114,35	58,61	10,51	326,50	114,18	58,79	10,28	315,57	
			<i>dif_fases</i>	diferença por fases				6,48	4,50	1,09	83,30	0,17	0,51	-0,03	3,77	0,17	-0,18	0,23	10,93	700
			<i>% fases</i>	percentagem da diferença entre fases				5,36%	7,07%	9,42%	20,14%	0,15%	0,87%	-0,30%	1,14%	0,15%	-0,30%	2,16%	3,35%	
			<i>dif_total</i>	diferença total entre a o estado de impressão e pós cozadura												6,82	4,83	1,29	98,00	
			<i>% total</i>	percentagem de retração a partir da impressão												5,6%	7,6%	11,1%	23,7%	
			<i>% total</i>	percentagem de retração a partir do projetado no modelo digital												4,9%	2,0%	-41,6%		
E71	120	60	7,26	121,76	63,71	11,75	405,00	114,99	59,18	10,69	324,80	114,30	59,00	10,08	321,00	114,38	59,11	10,21	308,20	
E71	120	60	7,26	121,49	63,34	11,37	413,10	114,72	59,40	10,46	329,20	114,16	59,10	10,51	325,20	114,31	58,87	10,45	312,50	
E71	120	60	7,26	121,37	63,79	11,18	403,40	114,65	58,95	10,30	320,20	114,22	58,67	10,07	316,40	114,18	58,67	10,02	304,00	
			<i>média</i>	121,54	63,61	11,43	407,17	114,79	59,18	10,48	324,73	114,22	58,92	10,22	320,87	114,29	58,88	10,23	308,23	
			<i>dif_fases</i>	diferença por fases				6,75	4,44	0,95	82,43	0,57	0,26	0,26	3,87	-0,07	0,04	-0,01	12,63	900
			<i>% fases</i>	percentagem da diferença entre fases				5,56%	6,97%	8,31%	20,25%	0,49%	0,43%	2,53%	1,19%	-0,06%	0,07%	-0,07%	3,94%	
			<i>dif_total</i>	diferença total entre a o estado de impressão e pós cozadura												7,25	4,73	1,21	98,93	
			<i>% total</i>	percentagem de retração a partir da impressão												6,0%	7,4%	10,6%	24,3%	
			<i>% total</i>	percentagem de retração a partir do projetado no modelo digital												4,8%	1,9%	-40,8%		
E71	120	60	7,26	121,44	62,77	10,93	400,70	114,84	58,93	10,13	320,60	114,51	58,75	10,08	316,60	114,30	58,45	10,19	303,00	
E71	120	60	7,26	121,60	63,09	11,24	400,40	114,77	58,75	10,95	320,10	114,54	58,58	10,28	316,20	114,17	58,66	10,35	302,60	
E71	120	60	7,26	121,45	62,92	10,96	401,30	114,69	58,88	9,93	321,70	114,20	58,72	9,96	317,80	114,07	58,72	9,90	304,20	
			<i>média</i>	121,50	62,93	11,04	400,80	114,77	58,85	10,34	320,80	114,42	58,68	10,11	316,87	114,18	58,61	10,14	303,27	
			<i>dif_fases</i>	diferença por fases				6,73	4,07	0,71	80,00	0,35	0,17	0,23	3,93	0,24	0,08	-0,04	13,60	1050
			<i>% fases</i>	percentagem da diferença entre fases				5,54%	6,47%	6,40%	19,96%	0,31%	0,29%	2,24%	1,23%	0,21%	0,13%	-0,38%	4,29%	
			<i>dif_total</i>	diferença total entre a o estado de impressão e pós cozadura												7,32	4,32	0,90	97,53	
			<i>% total</i>	percentagem de retração a partir da impressão												6,0%	6,9%	8,1%	24,3%	
			<i>% total</i>	percentagem de retração a partir do projetado no modelo digital												4,9%	2,3%	-39,7%		
			<i>média</i>	121,34	63,39	11,35	407,18	114,69	59,05	10,43	325,27	114,33	58,74	10,28	321,41					
			<i>dif_fases</i>	diferença por fases				6,65	4,34	0,92	81,91	0,36	0,31	0,16	3,86					
			<i>% fases</i>	percentagem da diferença entre fases				5,48%	6,84%	8,07%	20,12%	0,32%	0,53%	1,49%	1,19%					
			<i>dif_total</i>	diferença total entre a o estado de impressão e a estufa								7,02	4,65	1,07	85,77					
			<i>% total</i>	percentagem de retração a partir da impressão								5,8%	7,3%	9,4%	21,1%					
			<i>% total</i>	percentagem de retração a partir do projetado no modelo digital								5%	2%	-42%						



**Anexo 2.** Grés 130MP Fino

Modelo digital				Fabrico Aditivo (±27°C)				Temperatura ambiente (±27°C)				Estufa (110°C)				Forno (700°C, 900°C, 1050°C)				
ePf	mm altura	mm largura	mm espessura	mm altura	mm largura	mm espessura	g peso	mm altura	mm largura	mm espessura	g peso	mm altura	mm largura	mm espessura	g peso	mm altura	mm largura	mm espessura	g peso	
E72	120	60	7,26	121,10	63,50	11,70	408,00	110,58	59,10	10,46	321,50	110,24	58,56	10,45	317,40	110,17	58,55	10,43	305,90	
E72	120	60	7,26	120,99	64,73	13,49	471,70	111,91	61,51	12,53	369,80	111,80	60,83	11,87	365,10	111,47	61,57	12,74	252,10	
E72	120	60	7,26	120,30	63,30	10,89	353,30	112,76	57,95	10,13	277,10	112,16	57,60	10,40	273,70	112,18	57,69	9,93	263,80	
			<i>média</i>	120,80	63,84	12,03	411,00	111,75	59,52	11,04	322,80	111,40	58,99	10,91	318,73	111,27	59,27	11,03	273,93	
			<i>dif_fases</i>	diferença por fases				9,05	4,32	0,99	88,20	0,35	0,53	0,14	4,07	0,13	-0,28	-0,13	44,80	700
			<i>% fases</i>	percentagem da diferença entre fases				7,49%	6,77%	8,20%	21,46%	0,31%	0,89%	1,22%	1,26%	0,12%	-0,47%	-1,16%	14,06%	
			<i>dif_total</i>	diferença total entre a o estado de impressão e pós cozadura												9,53	4,58	0,99	137,07	
			<i>% total</i>	percentagem de retração a partir da impressão												7,9%	7,2%	8,3%	33,3%	
			<i>% total</i>	percentagem de retração a partir do projetado no modelo digital												7,3%	1,2%	-52,0%		
E72	120	60	7,26	121,20	62,17	11,22	379,00	112,17	58,97	10,27	298,10	112,07	58,55	10,35	294,10	111,98	58,38	10,45	281,80	
E72	120	60	7,26	121,05	63,41	11,44	397,70	112,23	58,60	10,12	312,70	112,00	58,25	10,29	308,60	111,72	58,22	10,37	296,00	
E72	120	60	7,26	121,42	62,21	12,04	380,40	112,38	58,53	10,88	300,80	112,21	58,53	10,75	296,80	111,87	59,19	10,95	284,70	
			<i>média</i>	121,22	62,60	11,57	385,70	112,26	58,70	10,42	303,87	112,09	58,44	10,46	299,83	111,86	58,59	10,59	287,50	
			<i>dif_fases</i>	diferença por fases				8,96	3,90	1,14	81,83	0,17	0,26	-0,04	4,03	0,23	-0,15	-0,13	12,33	900
			<i>% fases</i>	percentagem da diferença entre fases				7,39%	6,23%	9,88%	21,22%	0,15%	0,44%	-0,37%	1,33%	0,21%	-0,26%	-1,21%	4,11%	
			<i>dif_total</i>	diferença total entre a o estado de impressão e pós cozadura												9,37	4,01	0,98	98,20	
			<i>% total</i>	percentagem de retração a partir da impressão												7,7%	6,4%	8,5%	25,5%	
			<i>% total</i>	percentagem de retração a partir do projetado no modelo digital												6,8%	2,3%	-45,8%		
E72	120	60	7,26	120,92	62,80	10,91	335,00	112,40	57,26	9,62	264,60	112,15	57,16	9,29	261,00	110,85	56,49	9,20	249,20	
E72	120	60	7,26	120,82	63,07	12,01	357,00	112,99	59,40	11,02	284,00	112,54	58,89	11,04	280,20	111,00	58,42	11,09	267,70	
E72	120	60	7,26	121,46	63,04	9,85	339,30	113,20	57,83	9,18	270,60	113,04	57,04	9,77	267,00	111,74	56,26	9,17	255,10	
			<i>média</i>	121,07	62,97	10,92	343,77	112,86	58,16	9,94	273,07	112,58	57,70	10,03	269,40	111,20	57,06	9,82	257,33	
			<i>dif_fases</i>	diferença por fases				8,20	4,81	0,98	70,70	0,29	0,47	-0,09	3,67	1,38	0,64	0,22	12,07	1050
			<i>% fases</i>	percentagem da diferença entre fases				6,78%	7,63%	9,00%	20,57%	0,26%	0,81%	-0,94%	1,34%	1,23%	1,11%	2,14%	4,48%	
			<i>dif_total</i>	diferença total entre a o estado de impressão e pós cozadura												9,87	5,91	1,11	86,43	
			<i>% total</i>	percentagem de retração a partir da impressão												8,2%	9,4%	10,1%	25,1%	
			<i>% total</i>	percentagem de retração a partir do projetado no modelo digital												7,3%	4,9%	-35,2%		
			<i>média</i>	121,03	63,14	11,51	380,16	112,29	58,79	10,47	299,91	112,02	58,38	10,47	295,99					
			<i>dif_fases</i>	diferença por fases				8,74	4,34	1,04	80,24	0,27	0,42	0,00	3,92					
			<i>% fases</i>	percentagem da diferença entre fases				7,22%	6,88%	9,02%	21,11%	0,24%	0,71%	0,01%	1,31%					
			<i>dif_total</i>	diferença total entre a o estado de impressão e a estufa								9,01	4,76	1,04	84,17					
			<i>% total</i>	percentagem de retração a partir da impressão								7,4%	7,5%	9,0%	22,1%					
			<i>% total</i>	percentagem de retração a partir do projetado no modelo digital								7%	3%	-44%						

**Anexo 3.** Grés 130MP Grosso

Modelo digital				Fabrico Aditivo (±27°C)				Temperatura ambiente (±27°C)				Estufa (110°C)				Forno (700°C, 900°C, 1050°C)					
ePf	mm altura	mm largura	mm espessura	mm altura	mm largura	mm espessura	g peso	mm altura	mm largura	mm espessura	g peso	mm altura	mm largura	mm espessura	g peso	mm altura	mm largura	mm espessura	g peso		
E73	120	60	7,26	121,19	63,44	11,80	400,30	108,97	59,02	10,78	298,40	108,33	57,94	10,67	294,40	107,82	58,46	10,81	280,20		
E73	120	60	7,26	121,84	63,81	12,24	409,20	108,55	58,97	10,86	305,00	108,22	58,41	10,72	300,80	108,02	58,85	10,74	286,50		
E73	120	60	7,26	121,31	63,68	11,88	408,00	107,85	58,57	10,39	304,00	106,77	57,96	10,43	299,90	107,65	58,52	10,54	285,60		
			<i>média</i>	121,45	63,64	11,97	405,83	108,46	58,85	10,68	302,47	107,77	58,10	10,60	298,37	107,83	58,61	10,70	284,10		
			<i>dif_fases</i>	diferença por fases				12,99	4,79	1,30	103,37	0,69	0,75	0,07	4,10	-0,06	-0,51	-0,09	14,27	700	
			<i>% fases</i>	percentagem da diferença entre fases				10,70%	7,53%	10,83%	25,47%	0,63%	1,28%	0,69%	1,36%	-0,05%	-0,87%	-0,86%	4,78%		
			<i>dif_total</i>	diferença total entre a o estado de impressão e pós cozedura												13,62	5,04	1,28	121,73		
			<i>% total</i>	percentagem de retração a partir da impressão												11,2%	7,9%	10,7%	30,0%		
			<i>% total</i>	percentagem de retração a partir do projetado no modelo digital												10,1%	2,3%	-47,3%			
E73	120	60	7,26	121,50	63,69	12,10	401,80	109,09	59,12	10,51	299,40	108,23	58,53	10,51	295,00	107,57	58,41	10,58	279,30		
E73	120	60	7,26	121,52	63,67	11,82	402,60	108,94	59,02	10,72	300,50	108,09	58,88	10,71	296,20	107,58	58,65	10,53	280,40		
E73	120	60	7,26	121,66	63,54	12,60	409,90	108,49	58,97	10,63	305,70	108,02	58,79	10,65	301,30	107,42	58,63	10,55	285,40		
			<i>média</i>	121,56	63,63	12,17	404,77	108,84	59,04	10,62	301,87	108,11	58,73	10,62	297,50	107,52	58,56	10,55	281,70		
			<i>dif_fases</i>	diferença por fases				12,72	4,60	1,55	102,90	0,73	0,31	0,00	4,37	0,59	0,17	0,07	15,80	900	
			<i>% fases</i>	percentagem da diferença entre fases				10,46%	7,22%	12,76%	25,42%	0,67%	0,52%	-0,02%	1,45%	0,55%	0,29%	0,64%	5,31%		
			<i>dif_total</i>	diferença total entre a o estado de impressão e pós cozedura												14,04	5,07	1,62	123,07		
			<i>% total</i>	percentagem de retração a partir da impressão												11,5%	8,0%	13,3%	30,4%		
			<i>% total</i>	percentagem de retração a partir do projetado no modelo digital												10,4%	2,4%	-45,4%			
E73	120	60	7,26	121,58	63,51	12,15	414,50	108,69	58,90	10,78	309,50	108,07	58,63	10,49	304,80	104,69	57,34	10,24	287,00		
E73	120	60	7,26	121,62	63,42	11,78	410,00	108,79	59,03	10,69	306,30	108,22	58,60	10,69	301,70	104,76	57,47	10,32	284,10		
E73	120	60	7,26	121,83	63,79	11,48	412,60	108,98	58,57	10,78	307,70	108,16	58,34	10,39	303,20	104,84	57,71	10,10	285,40		
			<i>média</i>	121,68	63,57	11,80	412,37	108,82	58,83	10,75	307,83	108,15	58,52	10,52	303,23	104,76	57,51	10,22	285,50		
			<i>dif_fases</i>	diferença por fases				12,86	4,74	1,05	104,53	0,67	0,31	0,23	4,60	3,39	1,02	0,30	17,73	1050	
			<i>% fases</i>	percentagem da diferença entre fases				10,57%	7,46%	8,92%	25,35%	0,62%	0,53%	2,12%	1,49%	3,13%	1,73%	2,87%	5,85%		
			<i>dif_total</i>	diferença total entre a o estado de impressão e a estufa												16,92	6,07	1,58	126,87		
			<i>% total</i>	percentagem de retração a partir da impressão												13,9%	9,5%	13,4%	30,8%		
			<i>% total</i>	percentagem de retração a partir do projetado no modelo digital												12,7%	4,2%	-40,8%			
			<i>média</i>	121,56	63,62	11,98	407,66	108,71	58,91	10,68	304,06	108,01	58,45	10,58	299,70						
			<i>dif_fases</i>	diferença por fases				12,86	4,71	1,30	103,60	0,70	0,46	0,10	4,36						
			<i>% fases</i>	percentagem da diferença entre fases				10,58%	7,40%	10,86%	25,41%	0,64%	0,78%	0,94%	1,43%						
			<i>dif_total</i>	diferença total entre a o estado de impressão e a estufa												13,55	5,17	1,40	107,96		
			<i>% total</i>	percentagem de retração a partir da impressão												11,1%	8,1%	11,7%	26,5%		
			<i>% total</i>	percentagem de retração a partir do projetado no modelo digital												10%	3%	-46%			

**Anexo 4.** PCL1\*E.

Modelo digital				Fabrico Aditivo (±27°C)				Temperatura ambiente (±27°C)				Estufa (110°C)				Forno (700°C, 900°C, 1050°C)				
ePf	mm altura	mm largura	mm espessura	mm altura	mm largura	mm espessura	g peso	mm altura	mm largura	mm espessura	g peso	mm altura	mm largura	mm espessura	g peso	mm altura	mm largura	mm espessura	g peso	
E74	120	60	7,26	121,20	63,90	11,16	433,90	114,73	59,69	10,40	341,60	114,49	58,99	10,34	338,30	114,33	59,40	10,32	327,00	
E74	120	60	7,26	121,07	62,29	10,16	389,30	115,03	58,10	9,63	307,90	114,28	57,50	9,23	304,90	114,27	57,57	9,04	295,00	
E74	120	60	7,26	121,37	61,34	9,82	358,00	115,25	57,67	9,49	285,20	114,67	57,10	9,20	282,40	114,52	57,30	8,92	273,20	
			<i>média</i>	121,21	62,51	10,38	393,73	115,00	58,49	9,84	311,57	114,48	57,86	9,59	308,53	114,37	58,09	9,43	298,40	
			<i>dif_fases</i>	diferença por fases				6,21	4,02	0,54	82,17	0,53	0,63	0,25	3,03	0,11	-0,23	0,16	10,13	700
			<i>% fases</i>	percentagem da diferença entre fases				5,12%	6,44%	5,20%	20,87%	0,46%	1,07%	2,56%	0,97%	0,09%	-0,39%	1,70%	3,28%	
			<i>dif_total</i>	diferença total entre a o estado de impressão e pós cozedura												6,84	4,42	0,96	95,33	
			<i>% total</i>	percentagem de retração a partir da impressão												5,6%	7,1%	9,2%	24,2%	
			<i>% total</i>	percentagem de retração a partir do projetado no modelo digital												4,7%	3,2%	-29,8%		
E74	120	60	7,26	121,51	61,77	9,83	358,10	115,12	57,81	9,26	286,80	114,57	57,64	9,05	283,70	114,16	57,50	9,09	273,00	
E74	120	60	7,26	121,06	62,05	10,18	368,50	114,89	57,91	9,15	290,70	114,26	58,00	9,30	287,70	113,84	57,63	9,16	276,70	
E74	120	60	7,26	121,45	61,29	10,23	363,20	115,37	57,81	9,10	287,60	114,42	57,87	9,21	284,60	114,01	57,89	9,20	273,60	
			<i>média</i>	121,34	61,70	10,08	363,27	115,13	57,84	9,17	288,37	114,42	57,84	9,19	285,33	114,00	57,67	9,15	274,43	
			<i>dif_fases</i>	diferença por fases				6,21	3,86	0,91	74,90	0,71	0,01	-0,02	3,03	0,42	0,16	0,04	10,90	900
			<i>% fases</i>	percentagem da diferença entre fases				5,12%	6,26%	9,03%	20,62%	0,62%	0,01%	-0,16%	1,05%	0,36%	0,28%	0,42%	3,82%	
			<i>dif_total</i>	diferença total entre a o estado de impressão e pós cozedura												7,34	4,03	0,93	88,83	
			<i>% total</i>	percentagem de retração a partir da impressão												6,0%	6,5%	9,3%	24,5%	
			<i>% total</i>	percentagem de retração a partir do projetado no modelo digital												5,0%	3,9%	-26,0%		
E74	120	60	7,26	121,44	62,18	10,34	359,80	114,65	57,75	9,15	283,80	114,01	57,68	9,16	280,60	111,87	56,93	8,86	268,60	
E74	120	60	7,26	121,55	62,30	10,24	365,90	115,04	57,88	9,31	289,90	114,61	58,01	9,25	286,80	112,35	57,08	9,19	274,60	
E74	120	60	7,26	121,30	62,44	10,06	364,90	115,27	57,39	9,06	290,40	114,90	57,68	8,86	287,20	112,67	56,91	8,91	275,20	
			<i>média</i>	121,43	62,31	10,21	363,53	114,99	57,67	9,17	288,03	114,51	57,79	9,09	284,87	112,30	56,97	8,99	272,80	
			<i>dif_fases</i>	diferença por fases				6,44	4,63	1,04	75,50	0,48	-0,11	0,08	3,17	2,21	0,82	0,10	12,07	1050
			<i>% fases</i>	percentagem da diferença entre fases				5,31%	7,44%	10,18%	20,77%	0,42%	-0,20%	0,91%	1,10%	1,93%	1,41%	1,14%	4,24%	
			<i>dif_total</i>	diferença total entre a o estado de impressão e pós cozedura												9,13	5,34	1,23	90,73	
			<i>% total</i>	percentagem de retração a partir da impressão												7,5%	8,6%	12,0%	25,0%	
			<i>% total</i>	percentagem de retração a partir do projetado no modelo digital												6,4%	5,1%	-23,8%		
			<i>média</i>	121,33	62,17	10,22	373,51	115,04	58,00	9,39	295,99	114,47	57,83	9,29	292,91					
			<i>dif_fases</i>	diferença por fases				6,29	4,17	0,83	77,52	0,57	0,17	0,11	3,08					
			<i>% fases</i>	percentagem da diferença entre fases				5,18%	6,71%	8,12%	20,75%	0,50%	0,30%	1,14%	1,04%					
			<i>dif_total</i>	diferença total entre a o estado de impressão e a estufa								6,86	4,35	0,94	80,60					
			<i>% total</i>	percentagem de retração a partir da impressão								5,7%	7,0%	9,2%	21,6%					
			<i>% total</i>	percentagem de retração a partir do projetado no modelo digital								5%	4%	-28%						

**Anexo 5.** PRAI.



Modelo digital				Fabrico Aditivo (±27°C)				Temperatura ambiente (±27°C)				Estufa (110°C)				Forno (700°C, 900°C, 1050°C)				
ePf	mm altura	mm largura	mm espessura	mm altura	mm largura	mm espessura	g peso	mm altura	mm largura	mm espessura	g peso	mm altura	mm largura	mm espessura	g peso	mm altura	mm largura	mm espessura	g peso	
E75	120	60	7,26	121,32	63,64	12,09	406,80	111,95	59,19	10,57	322,60	111,49	58,88	10,65	318,10	110,95	58,72	10,43	301,90	
E75	120	60	7,26	121,80	63,63	11,92	425,50	112,26	59,48	10,69	337,10	111,54	59,30	10,71	332,40	110,91	59,04	10,58	315,60	
E75	120	60	7,26	121,27	63,93	12,20	400,07	111,83	59,21	10,29	317,30	111,46	58,89	10,45	312,80	111,06	58,49	10,17	297,10	
			<i>média</i>	121,46	63,73	12,07	410,79	112,01	59,29	10,52	325,67	111,50	59,02	10,60	321,10	110,97	58,75	10,39	304,87	
			<i>dif_fases</i>	diferença por fases				9,45	4,44	1,55	85,12	0,52	0,27	-0,08	4,57	0,53	0,27	0,21	16,23	700
			<i>% fases</i>	percentagem da diferença entre fases				7,78%	6,97%	12,87%	20,72%	0,46%	0,46%	-0,79%	1,40%	0,47%	0,47%	1,97%	5,06%	
			<i>dif_total</i>	diferença total entre a o estado de impressão e pós cozedura												10,50	4,99	1,68	105,92	
			<i>% total</i>	percentagem de retração a partir da impressão												8,6%	7,8%	13,9%	25,8%	
			<i>% total</i>	percentagem de retração a partir do projetado no modelo digital												7,5%	2,1%	-43,1%		
E75	120	60	7,26	121,60	63,03	11,09	399,70	112,42	58,77	9,98	316,90	111,59	58,54	9,82	312,30	111,09	58,17	10,03	293,10	
E75	120	60	7,26	121,08	63,42	11,46	403,40	112,25	59,14	10,14	320,20	111,70	58,79	10,24	315,60	111,25	58,19	10,22	296,50	
E75	120	60	7,26	121,62	63,46	11,39	400,90	111,66	58,66	9,94	318,30	111,66	58,47	10,16	313,50	110,84	57,99	9,95	294,70	
			<i>média</i>	121,43	63,30	11,31	401,33	112,11	58,86	10,02	318,47	111,65	58,60	10,07	313,80	111,06	58,11	10,06	294,77	
			<i>dif_fases</i>	diferença por fases				9,32	4,45	1,29	82,87	0,47	0,26	-0,05	4,67	0,59	0,48	0,01	19,03	900
			<i>% fases</i>	percentagem da diferença entre fases				7,68%	7,02%	11,43%	20,65%	0,41%	0,44%	-0,52%	1,47%	0,53%	0,82%	0,08%	6,07%	
			<i>dif_total</i>	diferença total entre a o estado de impressão e pós cozedura												10,38	5,19	1,25	106,57	
			<i>% total</i>	percentagem de retração a partir da impressão												8,5%	8,2%	11,0%	26,6%	
			<i>% total</i>	percentagem de retração a partir do projetado no modelo digital												7,5%	3,1%	-38,6%		
E75	120	60	7,26	121,18	63,93	11,47	405,10	111,92	58,97	10,35	321,50	111,43	58,77	10,23	316,60	110,31	57,72	9,99	296,00	
E75	120	60	7,26	121,23	63,55	11,12	409,70	112,10	59,13	10,70	324,80	111,22	58,94	10,49	319,90	110,38	57,88	10,30	299,30	
E75	120	60	7,26	121,43	64,03	11,75	415,10	111,81	59,00	10,40	329,10	111,35	59,03	10,49	324,20	110,30	57,82	10,10	303,50	
			<i>média</i>	121,28	63,84	11,45	409,97	111,94	59,03	10,48	325,13	111,33	58,91	10,40	320,23	110,33	57,81	10,13	299,60	
			<i>dif_fases</i>	diferença por fases				9,34	4,80	0,96	84,83	0,61	0,13	0,08	4,90	1,00	1,10	0,27	20,63	1050
			<i>% fases</i>	percentagem da diferença entre fases				7,70%	7,52%	8,42%	20,69%	0,55%	0,21%	0,79%	1,51%	0,90%	1,87%	2,60%	6,44%	
			<i>dif_total</i>	diferença total entre a o estado de impressão e pós cozedura												10,95	6,03	1,32	110,37	
			<i>% total</i>	percentagem de retração a partir da impressão												9,0%	9,4%	11,5%	26,9%	
			<i>% total</i>	percentagem de retração a partir do projetado no modelo digital												8,1%	3,7%	-39,5%		
			<i>média</i>	121,39	63,62	11,61	407,36	112,02	59,06	10,34	323,09	111,49	58,84	10,36	318,38					
			<i>dif_fases</i>	diferença por fases				9,37	4,56	1,27	84,27	0,53	0,22	-0,02	4,71					
			<i>% fases</i>	percentagem da diferença entre fases				7,72%	7,17%	10,94%	20,69%	0,48%	0,37%	-0,17%	1,46%					
			<i>dif_total</i>	diferença total entre a o estado de impressão e a estufa								9,90	4,78	1,25	88,99					
			<i>% total</i>	percentagem de retração a partir da impressão								8,2%	7,5%	10,8%	21,8%					
			<i>% total</i>	percentagem de retração a partir do projetado no modelo digital								7%	2%	-43%						

**Anexo 6.** PRLF.

Modelo digital				Fabrico Aditivo (±27°C)				Temperatura ambiente (±27°C)				Estufa (110°C)				Forno (700°C, 900°C, 1050°C)				
ePf	mm altura	mm largura	mm espessura	mm altura	mm largura	mm espessura	g peso	mm altura	mm largura	mm espessura	g peso	mm altura	mm largura	mm espessura	g peso	mm altura	mm largura	mm espessura	g peso	
E76	120	60	7,26	121,45	63,73	11,56	392,90	114,60	59,80	11,25	298,10	114,17	58,96	10,77	295,50	113,86	58,73	10,46	279,20	
E76	120	60	7,26	121,03	63,89	11,84	398,40	114,38	59,37	10,95	302,50	114,14	59,51	10,76	299,80	113,74	58,99	10,62	283,30	
E76	120	60	7,26	121,87	63,44	11,70	398,20	114,71	59,11	10,56	302,20	114,34	58,96	10,34	299,50	113,64	58,72	10,42	283,10	
			<i>média</i>	121,45	63,69	11,70	396,50	114,56	59,43	10,92	300,93	114,21	59,14	10,62	298,27	113,75	58,81	10,50	281,87	
			<i>dif_fases</i>	diferença por fases				6,89	4,26	0,78	95,57	0,35	0,29	0,30	2,67	0,47	0,33	0,12	16,40	700
			<i>% fases</i>	percentagem da diferença entre fases				5,67%	6,69%	6,67%	24,10%	0,31%	0,48%	2,73%	0,89%	0,41%	0,56%	1,18%	5,50%	
			<i>dif_total</i>	diferença total entre a o estado de impressão e pós cozadura												7,71	4,88	1,20	114,63	
			<i>% total</i>	percentagem de retração a partir da impressão												6,3%	7,7%	10,3%	28,9%	
			<i>% total</i>	percentagem de retração a partir do projetado no modelo digital												5,2%	2,0%	-44,6%		
E76	120	60	7,26	121,64	63,64	11,34	389,80	114,52	59,43	10,56	295,80	114,18	59,00	10,30	293,00	113,62	58,72	10,16	275,80	
E76	120	60	7,26	121,16	62,63	11,09	388,30	115,02	59,18	10,47	294,60	114,32	58,95	10,28	291,80	113,65	58,55	10,11	274,60	
E76	120	60	7,26	121,37	63,41	11,49	389,30	115,20	59,32	10,28	294,90	114,47	58,88	10,16	292,10	113,49	58,40	10,18	274,80	
			<i>média</i>	121,39	63,23	11,31	389,13	114,91	59,31	10,44	295,10	114,32	58,94	10,24	292,30	113,58	58,55	10,15	275,07	
			<i>dif_fases</i>	diferença por fases				6,48	3,92	0,87	94,03	0,59	0,37	0,20	2,80	0,74	0,39	0,09	17,23	900
			<i>% fases</i>	percentagem da diferença entre fases				5,34%	6,19%	7,69%	24,16%	0,51%	0,62%	1,87%	0,95%	0,65%	0,66%	0,91%	5,90%	
			<i>dif_total</i>	diferença total entre a o estado de impressão e pós cozadura												7,81	4,67	1,16	114,07	
			<i>% total</i>	percentagem de retração a partir da impressão												6,4%	7,4%	10,2%	29,3%	
			<i>% total</i>	percentagem de retração a partir do projetado no modelo digital												5,3%	2,4%	-39,8%		
E76	120	60	7,26	121,64	63,35	11,59	385,70	114,82	59,12	10,25	293,30	114,44	58,69	10,18	290,40	110,30	57,23	9,93	272,90	
E76	120	60	7,26	121,30	62,82	11,58	384,70	114,89	59,18	10,30	292,30	114,23	58,71	10,25	289,40	110,08	57,26	10,41	271,90	
E76	120	60	7,26	121,01	63,56	11,68	404,70	114,81	59,53	10,60	306,40	114,26	59,03	10,54	303,40	109,82	57,38	10,22	285,00	
			<i>média</i>	121,32	63,24	11,62	391,70	114,84	59,28	10,38	297,33	114,31	58,81	10,32	294,40	110,07	57,29	10,18	276,60	
			<i>dif_fases</i>	diferença por fases				6,48	3,97	1,23	94,37	0,53	0,47	0,06	2,93	4,24	1,52	0,14	17,80	1050
			<i>% fases</i>	percentagem da diferença entre fases				5,34%	6,27%	10,62%	24,09%	0,46%	0,79%	0,63%	0,99%	3,71%	2,58%	1,31%	6,05%	
			<i>dif_total</i>	diferença total entre a o estado de impressão e pós cozadura												11,25	5,95	1,43	115,10	
			<i>% total</i>	percentagem de retração a partir da impressão												9,3%	9,4%	12,3%	29,4%	
			<i>% total</i>	percentagem de retração a partir do projetado no modelo digital												8,3%	4,5%	-40,3%		
			<i>média</i>	121,39	63,39	11,54	392,44	114,77	59,34	10,58	297,79	114,28	58,96	10,39	294,99					
			<i>dif_fases</i>	diferença por fases				6,61	4,05	0,96	94,66	0,49	0,38	0,19	2,80					
			<i>% fases</i>	percentagem da diferença entre fases				5,45%	6,39%	8,33%	24,12%	0,43%	0,63%	1,76%	0,94%					
			<i>dif_total</i>	diferença total entre a o estado de impressão e a estufa								7,10	4,42	1,15	97,46					
			<i>% total</i>	percentagem de retração a partir da impressão								5,9%	7,0%	9,9%	24,8%					
			<i>% total</i>	percentagem de retração a partir do projetado no modelo digital								5%	2%	-43%						

**Anexo 7.** ANETO.

Modelo digital				Fabrico Aditivo (±27°C)				Temperatura ambiente (±27°C)				Estufa (110°C)				Forno (700°C, 900°C, 1050°C)					
ePf	mm altura	mm largura	mm espessura	mm altura	mm largura	mm espessura	g peso	mm altura	mm largura	mm espessura	g peso	mm altura	mm largura	mm espessura	g peso	mm altura	mm largura	mm espessura	g peso		
E77	120	60	7,26	121,34	63,62	11,73	420,30	111,82	59,27	10,58	332,40	110,99	58,89	10,52	332,80	110,47	58,83	10,52	315,00		
E77	120	60	7,26	121,56	64,35	12,12	428,60	111,50	59,30	10,61	338,80	111,00	58,88	10,51	326,50	110,44	58,72	10,34	309,30		
E77	120	60	7,26	121,60	64,16	12,06	441,90	111,65	59,14	10,67	348,90	111,01	59,02	10,61	342,70	110,77	59,06	10,46	324,40		
			<i>média</i>	121,50	64,04	11,97	430,27	111,66	59,24	10,62	340,03	111,00	58,93	10,54	334,00	110,56	58,87	10,44	316,23		
			<i>dif_fases</i>	diferença por fases				9,84	4,81	1,35	90,23	0,66	0,31	0,08	6,03	0,44	0,06	0,11	17,77	700	
			<i>% fases</i>	percentagem da diferença entre fases				8,10%	7,51%	11,28%	20,97%	0,59%	0,52%	0,72%	1,77%	0,40%	0,10%	1,01%	5,32%		
			<i>dif_total</i>	diferença total entre a o estado de impressão e pós cozedura												10,94	5,17	1,53	114,03		
			<i>% total</i>	percentagem de retração a partir da impressão												9,0%	8,1%	12,8%	26,5%		
			<i>% total</i>	percentagem de retração a partir do projetado no modelo digital												7,9%	1,9%	-43,8%			
E77	120	60	7,26	121,45	63,94	11,91	436,00	111,58	59,41	10,46	344,20	111,19	58,96	10,30	337,80	110,03	58,14	10,38	316,00		
E77	120	60	7,26	121,19	63,96	11,23	424,40	111,24	59,09	10,54	334,80	111,05	58,88	10,55	328,70	110,14	58,53	10,43	307,60		
E77	120	60	7,26	121,26	64,03	11,90	432,20	111,25	59,65	10,64	342,40	111,18	59,16	10,50	336,00	110,18	58,76	10,68	314,60		
			<i>média</i>	121,30	63,98	11,68	430,87	111,36	59,38	10,55	340,47	111,14	59,00	10,45	334,17	110,11	58,47	10,50	312,73		
			<i>dif_fases</i>	diferença por fases				9,94	4,59	1,13	90,40	0,22	0,38	0,10	6,30	1,02	0,53	-0,05	21,43	900	
			<i>% fases</i>	percentagem da diferença entre fases				8,20%	7,18%	9,70%	20,98%	0,20%	0,65%	0,93%	1,85%	0,92%	0,90%	-0,46%	6,41%		
			<i>dif_total</i>	diferença total entre a o estado de impressão e pós cozedura												11,19	5,51	1,18	118,13		
			<i>% total</i>	percentagem de retração a partir da impressão												9,2%	8,6%	10,1%	27,4%		
			<i>% total</i>	percentagem de retração a partir do projetado no modelo digital												8,2%	2,5%	-44,6%			
E77	120	60	7,26	120,95	63,88	12,09	421,10	111,75	58,93	10,52	333,90	111,25	58,87	10,71	327,60	109,13	57,03	10,30	305,60		
E77	120	60	7,26	121,01	64,40	12,30	434,60	111,45	59,39	10,58	344,00	110,93	59,25	10,85	337,50	108,92	57,23	10,34	314,90		
E77	120	60	7,26	121,39	63,90	11,40	431,50	111,70	59,06	10,62	342,10	111,12	58,86	10,73	335,60	109,26	56,95	10,22	313,10		
			<i>média</i>	121,12	64,06	11,93	429,07	111,63	59,13	10,57	340,00	111,10	58,99	10,76	333,57	109,10	57,07	10,28	311,20		
			<i>dif_fases</i>	diferença por fases				9,48	4,93	1,36	89,07	0,54	0,13	-0,19	6,43	2,00	1,92	0,48	22,37	1050	
			<i>% fases</i>	percentagem da diferença entre fases				7,83%	7,70%	11,37%	20,76%	0,48%	0,23%	-1,78%	1,89%	1,80%	3,26%	4,44%	6,71%		
			<i>dif_total</i>	diferença total entre a o estado de impressão e pós cozedura												12,02	6,99	1,65	117,87		
			<i>% total</i>	percentagem de retração a partir da impressão												9,9%	10,9%	13,8%	27,5%		
			<i>% total</i>	percentagem de retração a partir do projetado no modelo digital												9,1%	4,9%	-41,6%			
			<i>média</i>	121,31	64,03	11,86	430,07	111,55	59,25	10,58	340,17	111,08	58,97	10,58	333,91						
			<i>dif_fases</i>	diferença por fases				9,76	4,78	1,28	89,90	0,47	0,28	0,00	6,26						
			<i>% fases</i>	percentagem da diferença entre fases				8,04%	7,46%	10,79%	20,90%	0,42%	0,47%	-0,04%	1,84%						
			<i>dif_total</i>	diferença total entre a o estado de impressão e a estufa								10,23	5,05	1,28	96,16						
			<i>% total</i>	percentagem de retração a partir da impressão								8,4%	7,9%	10,8%	22,4%						
			<i>% total</i>	percentagem de retração a partir do projetado no modelo digital								7%	2%	-46%							

**Anexo 8.** PRNF.

ePf	Modelo digital			Fabrico Aditivo (±27°C)				Temperatura ambiente (±27°C)				Estufa (110°C)				Forno (700°C, 900°C, 1050°C)				
	mm altura	mm largura	mm espessura	mm altura	mm largura	mm espessura	g peso	mm altura	mm largura	mm espessura	g peso	mm altura	mm largura	mm espessura	g peso	mm altura	mm largura	mm espessura	g peso	
E78	120	60	7,26	121,72	64,01	12,70	435,40	109,98	59,55	11,11	337,50	109,33	59,12	10,85	333,30	109,77	59,48	10,85	320,60	700
			<i>média</i>	121,72	64,01	12,70	435,40	109,98	59,55	11,11	337,50	109,33	59,12	10,85	333,30	109,77	59,48	10,85	320,60	
			<i>dif_fases</i>	diferença por fases				11,74	4,46	1,59	97,90	0,66	0,43	0,27	4,20	-0,45	-0,36	0,00	12,70	
			<i>% fases</i>	percentagem da diferença entre fases				9,65%	6,97%	12,52%	22,49%	0,60%	0,72%	2,39%	1,24%	-0,41%	-0,61%	0,00%	3,81%	
			<i>dif_total</i>	diferença total entre a o estado de impressão e pós cozedura												11,95	4,53	1,86	114,80	
			<i>% total</i>	percentagem de retração a partir da impressão												9,8%	7,1%	14,6%	26,4%	
			<i>% total</i>	percentagem de retração a partir do projetado no modelo digital												8,5%	0,9%	-49,4%		
E78	120	60	7,26	121,23	64,52	12,40	436,60	110,09	59,36	10,83	338,80	109,37	59,19	10,97	334,40	109,27	59,43	10,88	319,50	900
			<i>média</i>	121,23	64,52	12,40	436,60	110,09	59,36	10,83	338,80	109,37	59,19	10,97	334,40	109,27	59,43	10,88	319,50	
			<i>dif_fases</i>	diferença por fases				11,14	5,16	1,57	97,80	0,72	0,17	-0,14	4,40	0,11	-0,24	0,09	14,90	
			<i>% fases</i>	percentagem da diferença entre fases				9,19%	8,00%	12,66%	22,40%	0,65%	0,29%	-1,25%	1,30%	0,10%	-0,41%	0,82%	4,46%	
			<i>dif_total</i>	diferença total entre a o estado de impressão e pós cozedura												11,97	5,10	1,53	117,10	
			<i>% total</i>	percentagem de retração a partir da impressão												9,9%	7,9%	12,3%	26,8%	
			<i>% total</i>	percentagem de retração a partir do projetado no modelo digital												8,9%	1,0%	-49,8%		
E78	120	60	7,26	121,77	64,47	12,30	431,00	109,96	59,14	10,59	335,40	109,52	59,11	10,80	330,90	106,86	57,96	10,57	314,60	1050
			<i>média</i>	121,77	64,47	12,30	431,00	109,96	59,14	10,59	335,40	109,52	59,11	10,80	330,90	106,86	57,96	10,57	314,60	
			<i>dif_fases</i>	diferença por fases				11,81	5,33	1,71	95,60	0,44	0,03	-0,21	4,50	2,67	1,15	0,23	16,30	
			<i>% fases</i>	percentagem da diferença entre fases				9,70%	8,27%	13,90%	22,18%	0,40%	0,06%	-1,98%	1,34%	2,43%	1,94%	2,13%	4,93%	
			<i>dif_total</i>	diferença total entre a o estado de impressão e pós cozedura												14,92	6,51	1,73	116,40	
			<i>% total</i>	percentagem de retração a partir da impressão												12,2%	10,1%	14,1%	27,0%	
			<i>% total</i>	percentagem de retração a partir do projetado no modelo digital												11,0%	3,4%	-45,6%		
			<i>média</i>	121,57	64,33	12,47	434,33	110,01	59,35	10,84	337,23	109,41	59,14	10,87	332,87					
			<i>dif_fases</i>	diferença por fases				11,56	4,98	1,62	97,10	0,61	0,21	-0,03	4,37					
			<i>% fases</i>	percentagem da diferença entre fases				9,51%	7,75%	13,02%	22,36%	0,55%	0,36%	-0,25%	1,29%					
			<i>dif_total</i>	diferença total entre a o estado de impressão e a estufa								12,17	5,20	1,60	101,47					
			<i>% total</i>	percentagem de retração a partir da impressão								10,0%	8,1%	12,8%	23,4%					
			<i>% total</i>	percentagem de retração a partir do projetado no modelo digital								7%	2%	-46%						



**Anexo 9.** N208.

Modelo digital				Fabrico Aditivo (±27°C)				Temperatura ambiente (±27°C)				Estufa (110°C)				Forno (700°C, 900°C, 1050°C)				
ePf	mm altura	mm largura	mm espessura	mm altura	mm largura	mm espessura	g peso	mm altura	mm largura	mm espessura	g peso	mm altura	mm largura	mm espessura	g peso	mm altura	mm largura	mm espessura	g peso	
E79	120	60	7,26	118,02	66,08	12,91	422,50	112,97	60,85	12,22	328,30	113,09	61,21	12,16	325,80	112,66	60,51	11,85	307,40	
E79	120	60	7,26	114,46	63,50	11,30	361,50	109,57	57,39	9,49	276,50	109,44	57,73	9,93	274,40	108,47	57,19	10,34	259,70	
E79	120	60	7,26	119,73	64,33	12,00	386,60	114,39	60,03	11,09	296,10	114,52	60,03	11,03	293,90	113,90	59,44	10,86	277,60	
			<i>média</i>	117,40	64,64	12,07	390,20	112,31	59,42	10,93	300,30	112,35	59,65	11,04	298,03	111,67	59,04	11,02	281,57	
			<i>dif_fases</i>	diferença por fases				5,09	5,21	1,14	89,90	-0,04	-0,23	-0,11	2,27	0,67	0,61	0,03	16,47	700
			<i>% fases</i>	percentagem da diferença entre fases				4,34%	8,07%	9,42%	23,04%	-0,03%	-0,39%	-0,98%	0,75%	0,60%	1,02%	0,23%	5,53%	
			<i>dif_total</i>	diferença total entre a o estado de impressão e pós cozadura												5,73	5,59	1,06	108,63	
			<i>% total</i>	percentagem de retração a partir da impressão												4,9%	8,7%	8,7%	27,8%	
			<i>% total</i>	percentagem de retração a partir do projetado no modelo digital												6,9%	1,6%	-51,7%		
E79	120	60	7,26	120,05	63,55	11,68	400,20	115,26	59,42	11,24	311,90	114,33	59,34	10,98	309,40	113,63	58,82	11,11	291,10	
E79	120	60	7,26	120,01	62,82	12,68	383,20	115,02	59,78	11,20	295,50	114,39	59,81	11,08	293,30	113,80	59,36	11,07	275,90	
E79	120	60	7,26	120,04	63,64	12,10	383,70	115,51	59,95	10,42	297,90	115,21	59,48	10,65	295,70	114,30	58,53	10,77	278,10	
			<i>média</i>	120,03	63,34	12,15	389,03	115,26	59,72	10,95	301,77	114,64	59,54	10,90	299,47	113,91	58,90	10,98	281,70	
			<i>dif_fases</i>	diferença por fases				4,77	3,62	1,20	87,27	0,63	0,18	0,05	2,30	0,73	0,64	-0,08	17,77	900
			<i>% fases</i>	percentagem da diferença entre fases				3,97%	5,72%	9,87%	22,43%	0,54%	0,29%	0,49%	0,76%	0,64%	1,07%	-0,73%	5,93%	
			<i>dif_total</i>	diferença total entre a o estado de impressão e pós cozadura												6,13	4,43	1,17	107,33	
			<i>% total</i>	percentagem de retração a partir da impressão												5,1%	7,0%	9,7%	27,6%	
			<i>% total</i>	percentagem de retração a partir do projetado no modelo digital												5,1%	1,8%	-51,2%		
E79	120	60	7,26	120,01	63,53	11,90	391,20	115,30	58,51	11,41	305,90	114,78	59,36	11,44	303,40	108,89	57,40	11,02	385,00	
E79	120	60	7,26	117,58	69,83	10,41	366,00	112,53	57,97	10,12	284,30	111,43	57,40	10,37	282,10	106,21	55,85	9,69	264,90	
E79	120	60	7,26	119,97	62,71	11,40	376,90	114,59	58,10	10,30	292,50	114,31	58,12	10,40	290,20	109,37	56,31	9,93	272,60	
			<i>média</i>	119,19	65,36	11,24	378,03	114,14	58,19	10,61	294,23	113,50	58,29	10,73	291,90	108,16	56,52	10,21	307,50	
			<i>dif_fases</i>	diferença por fases				5,05	7,16	0,63	83,80	0,64	-0,10	-0,12	2,33	5,35	1,77	0,52	-15,60	1050
			<i>% fases</i>	percentagem da diferença entre fases				4,23%	10,96%	5,58%	22,17%	0,56%	-0,17%	-1,15%	0,79%	4,71%	3,04%	4,86%	-5,34%	
			<i>dif_total</i>	diferença total entre a o estado de impressão e pós cozadura												11,03	8,84	1,03	70,53	
			<i>% total</i>	percentagem de retração a partir da impressão												9,3%	13,5%	9,1%	18,7%	
			<i>% total</i>	percentagem de retração a partir do projetado no modelo digital												9,9%	5,8%	-40,6%		
			<i>média</i>	118,87	64,44	11,82	385,76	113,90	59,11	10,83	298,77	113,50	59,16	10,89	296,47					
			<i>dif_fases</i>	diferença por fases				4,97	5,33	0,99	86,99	0,41	-0,05	-0,06	2,30					
			<i>% fases</i>	percentagem da diferença entre fases				4,18%	8,27%	8,36%	22,55%	0,36%	-0,09%	-0,54%	0,77%					
			<i>dif_total</i>	diferença total entre a o estado de impressão e a estufa								5,38	5,28	0,93	89,29					
			<i>% total</i>	percentagem de retração a partir da impressão								4,5%	8,2%	7,9%	23,1%					
			<i>% total</i>	percentagem de retração a partir do projetado no modelo digital								5%	1%	-50%						

**Anexo 10.** 03ACT.

**Anexo 11.** Tabelas com os valores obtidos nos três momentos de registos na fase da pré-cozedura. (R1,R2,R3)

(a) tabela referente à altura; (b) tabela referente à largura do diâmetro exterior do provete; (c) tabela referente à espessura da parede do provete; (d) tabela com resultados adquiridos em relação ao peso do provete;

a

<i>Pasta</i>	<i>aR1</i> (mm)	<i>aR2</i> (mm)	<i>aR3</i> (mm)	<i>MD vs aR1</i>	<i>aR1 vs aR3</i>	<i>MD vs aR3</i>
Grés 130 MP	120,69	106,90	106,40	-0,66%	11,84%	11,34%
GRÉS 130 MP Fino	121,34	114,69	114,33	-1,12%	5,78%	4,73%
GRÉS 130 MP Grosso	121,03	112,29	112,02	-0,86%	7,44%	6,65%
PCLI*E	121,56	108,71	108,01	-1,30%	11,15%	9,99%
PRAI	121,33	115,04	114,47	-1,11%	5,66%	4,61%
PRLF	121,39	112,02	111,49	-1,16%	8,16%	7,09%
ANETO	121,39	114,77	114,28	-1,15%	5,85%	4,77%
PRNF	121,31	111,55	111,08	-1,09%	8,43%	7,44%
N208	121,57	110,01	109,41	-1,31%	10,01%	8,83%
03ACT	118,87	113,90	113,50	0,94%	4,52%	5,42%

b

<i>Pasta</i>	<i>IR1</i> (mm)	<i>IR2</i> (mm)	<i>IR3</i> (mm)	<i>MD vs IR1</i>	<i>IR1 vs IR3</i>	<i>MD vs IR3</i>
Grés 130 MP	63,47	58,11	57,89	-5,79%	8,80%	3,52%
GRÉS 130 MP Fino	63,39	59,05	58,74	-5,64%	7,33%	2,10%
GRÉS 130 MP Grosso	63,14	58,79	58,38	-5,23%	7,54%	2,71%
PCLI*E	63,62	58,91	58,45	-6,03%	8,12%	2,58%
PRAI	62,17	58,00	57,83	-3,62%	6,99%	3,62%
PRLF	63,62	59,06	58,84	-6,04%	7,52%	1,93%
ANETO	63,39	59,34	58,96	-5,64%	6,98%	1,73%
PRNF	64,03	59,25	58,97	-6,71%	7,89%	1,71%
N208	64,33	59,35	59,14	-7,22%	8,08%	1,44%
03ACT	64,44	59,11	59,16	-7,41%	8,19%	1,40%

c

<i>Pasta</i>	<i>eR1</i> (mm)	<i>eR2</i> (mm)	<i>eR3</i> (mm)	<i>MD vs eR1</i>	<i>eR1 vs eR3</i>	<i>MD vs eR3</i>
Grés 130 MP	11,26	10,01	9,97	-55,08%	11,47%	-37,30%
GRÉS 130 MP Fino	11,35	10,43	10,28	-56,31%	9,43%	-41,56%
GRÉS 130 MP Grosso	11,51	10,47	10,47	-58,48%	9,03%	-44,17%
PCLI*E	11,98	10,68	10,58	-65,06%	11,69%	-45,76%
PRAI	10,22	9,39	9,29	-40,83%	9,16%	-27,93%
PRLF	11,61	10,34	10,36	-59,92%	10,79%	-42,66%
ANETO	11,54	10,58	10,39	-58,97%	9,94%	-43,17%
PRNF	11,86	10,58	10,58	-63,36%	10,76%	-45,79%
N208	12,47	10,84	10,87	-71,72%	12,81%	-49,72%
O3ACT	11,82	10,83	10,89	-62,81%	7,86%	-50,01%

d

<i>Pasta</i>	<i>pR1</i> (mm)	<i>pR2</i> (mm)	<i>pR3</i> (mm)	<i>pR1 vs pR3</i>
Grés 130 MP	379,54	284,66	279,61	26,33%
GRÉS 130 MP Fino	407,18	325,27	321,41	21,06%
GRÉS 130 MP Grosso	380,16	299,91	295,99	22,14%
PCLI*E	407,66	304,06	299,70	26,48%
PRAI	373,51	295,99	292,91	21,58%
PRLF	407,36	323,09	318,38	21,84%
ANETO	392,44	297,79	294,99	24,83%
PRNF	430,07	340,17	333,91	22,36%
N208	434,33	337,23	332,87	23,36%
O3ACT	385,76	298,77	296,47	23,15%

**Anexo 12.** Tabelas com os resultados médios e máximos das dimensões, força e tensão para cada curva de cozedura.

700°C								
	Média				Média			Max
<i>Pasta</i>	<i>Di (mm)</i>	<i>De (mm)</i>	<i>H (mm)</i>	<i>A (mm<sup>2</sup>)</i>	<i>F (kN)</i>	<i>σ (kN/mm<sup>2</sup>)</i>	<i>σ (MPa)</i>	<i>σ (MPa)</i>
GRÉS 130 MP	37,88	58,18	106,02	1531,24	15,80	0,010	10,32	11,23
GRÉS 130 MP Fino	38,22	58,79	114,18	1566,70	8,70	0,006	5,55	6,91
GRÉS 130 MP Grosso	37,20	59,27	111,27	1671,68	5,90	0,004	3,53	3,58
PCLI*E	37,22	58,61	107,83	1609,80	6,37	0,004	3,96	4,73
PRAI	39,24	58,09	114,37	1440,90	5,62	0,004	3,90	4,03
PRLF	37,96	58,75	110,97	1578,62	9,18	0,006	5,81	5,94
ANETO	37,82	58,81	113,75	1593,14	7,74	0,005	4,86	5,49
PRNF	38,00	58,87	110,56	1588,02	7,86	0,005	4,95	5,28
N208	37,79	59,48	109,77	1657,02	9,95	0,006	6,01	6,01
O3ACT	37,01	59,04	111,67	1662,00	3,60	0,002	2,16	3,27

900°C								
	Média				Média			Max
<i>Pasta</i>	<i>Di (mm)</i>	<i>De (mm)</i>	<i>H (mm)</i>	<i>A (mm<sup>2</sup>)</i>	<i>F (kN)</i>	<i>σ (kN/mm<sup>2</sup>)</i>	<i>σ (MPa)</i>	<i>σ (MPa)</i>
GRÉS 130 MP	38,19	57,72	106,10	1471,10	34,42	0,023	23,40	27,62
GRÉS 130 MP Fino	38,43	58,88	114,29	1562,93	30,00	0,019	19,19	20,60
GRÉS 130 MP Grosso	37,42	58,59	111,86	1596,79	17,70	0,011	11,08	13,86
PCLI*E	37,46	58,56	107,52	1591,68	32,73	0,021	20,57	21,70
PRAI	39,38	57,67	114,00	1394,37	31,73	0,023	22,76	24,10
PRLF	37,99	58,11	111,06	1519,10	26,37	0,017	17,36	18,40
ANETO	38,26	58,55	113,58	1543,24	27,37	0,018	17,73	17,84
PRNF	37,48	58,47	110,11	1582,04	28,43	0,018	17,97	18,88
N208	37,68	59,43	109,27	1658,70	42,60	0,026	25,68	25,68
O3ACT	36,94	58,90	113,91	1653,10	15,37	0,009	9,30	11,47

1050°C								
	Média				Média			Max
<i>Pasta</i>	<i>Di (mm)</i>	<i>De (mm)</i>	<i>H (mm)</i>	<i>A (mm<sup>2</sup>)</i>	<i>F (kN)</i>	<i>σ (kN/mm<sup>2</sup>)</i>	<i>σ (MPa)</i>	<i>σ (MPa)</i>
GRÉS 130 MP	37,59	56,54	102,25	1400,96	76,77	0,055	54,80	78,16
GRÉS 130 MP Fino	38,32	58,61	114,18	1544,40	51,03	0,033	33,04	33,93
GRÉS 130 MP Grosso	37,42	57,06	111,20	1457,02	15,87	0,011	10,89	11,71
PCLI*E	37,07	57,51	104,76	1518,18	84,63	0,056	55,75	57,13
PRAI	39,00	56,97	112,30	1354,69	86,50	0,064	63,85	66,97
PRLF	37,55	57,81	110,33	1517,23	28,50	0,019	18,78	19,63
ANETO	36,92	57,29	110,07	1507,03	64,57	0,043	42,84	44,99
PRNF	36,50	57,07	109,10	1511,44	29,13	0,019	19,28	19,65
N208	36,82	57,96	106,86	1573,66	93,60	0,059	59,48	59,48
O3ACT	36,10	56,52	108,16	1485,42	48,40	0,033	32,58	34,00