

Exemplos de Aplicação de Impressão 3D na Construção

ANA CARLA PIRES SILVA

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM CONSTRUÇÕES

Orientador: Professor Doutor Alfredo Augusto Vieira Soeiro

JUNHO DE 2020

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2019/2020

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2018/2019 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2019.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

À minha família

*When something is important enough,
you do it even if the odds are not in your favour.*

Elon Musk

AGRADECIMENTOS

Desde já, gostaria de agradecer ao meu orientador, Professor Doutor Alfredo Augusto Vieira Soeiro, por todo o acompanhamento, disponibilidade e apoio demonstrados ao longo do período de realização desta dissertação, bem como por todos os conhecimentos e competências que adquiri durante a unidade curricular de Direção de Obra.

Ao Engenheiro Eduardo Costa, agradeço por me ter disponibilizado as melhores condições de trabalho, pela simpatia, motivação e ensinamentos ao longo de todo o trabalho prático realizado com a impressora 3D, assim como por todas as ideias e questões que levantou, o que ajudou imenso todo o processo.

Aos meus colegas e amigos da FEUP, em especial, ao Chambel, Daniel, Diogo, Duarte, Ivan, Quinaz, Rafa, Rocha, Tojó, Tomé e Vinagre, por todas as horas de estudo e intervalos no DEC, por todo o companheirismo, solidariedade e amizade que sempre demonstraram, por todo o apoio nas horas menos boas e de stress mas, sobretudo, por terem tornado todo o meu percurso académico inesquecível. Um agradecimento especial ao João Quinaz, Gonçalo Martins, Ivan Almeida e Duarte Costa, por serem verdadeiros irmãos também fora da faculdade, sem dúvida alguma, foram e sempre serão a minha família do Porto.

A toda a minha família de Erasmus, por me ter proporcionado tantos momentos felizes durante a minha estadia em Twente, na Holanda. Com eles cresci e encontrei-me outra vez, novos horizontes abriram-se e, por isso, novas oportunidades surgiram na minha vida. Mas sobretudo à, Sofia Gonçalves, que desde que nos conhecemos se tornou num pilar, uma fonte de sabedoria e discernimento, um apoio incondicional, uma motivação, a melhor conselheira. Mesmo estando tão longe, está sempre muito perto.

Às minhas amigas da Cidade Berço, a Bárbara, a Chica, a Filipa, a Inês, a Kokas e a Ju, que acompanharam todo o meu percurso académico, bem como o resto de toda a minha vida, apoiando-me sempre nas alturas em que estava mais desmotivada e nos momentos mais difíceis. Obrigada por todos os nossos reencontros, as nossas conversas, as nossas parvoíces e as nossas confissões. Que a nossa amizade, que já dura há bons largos anos, continue para sempre.

Ao meu Hugo, por todo o amor, amizade e companheirismo demonstrado nos últimos anos, por toda a paciência que sempre teve comigo nos momentos de maior ansiedade e preocupação, por todo o apoio e confiança que sempre depositou em mim e por todas as nossas aventuras e histórias que temos juntos. Obrigada também por ser um exemplo para mim.

Por último, um grande e especial agradecimento à minha família. Ao meu irmão João, por ser o meu melhor amigo desde que nasci, por ser a pessoa que sempre mais me protegeu e que eu tenho a certeza absoluta que estará para sempre na minha vida. À Tininha, que nos últimos anos se comportou como uma verdadeira irmã mais velha, ouvindo-me e aconselhando-me nas matérias mais sensíveis, mas também partilhando uma enorme paixão, que é o amor à Natureza. Ao meu Pai, Vitorino Silva, por me ter inspirado na escolha do meu curso, por nunca ter deixado de acreditar em mim e por ter sempre mostrado o orgulho, amor e carinho que sente por mim. Á minha querida Mãe, Maria Pires, que foi sempre o maior exemplo que eu tive na vida, a minha professora do dia-a-dia, a minha companheira, a minha conselheira e, sem dúvida alguma, o meu maior apoio. A pessoa que está sempre lá para mim. Sem eles nunca teria chegado onde cheguei, obrigada por ambos me terem sempre ajudado, quando mais precisei, incondicionalmente. Não tenho como lhes agradecer.

RESUMO

Nos dias de hoje, abordar a aplicabilidade da Impressão 3D na Construção é inevitável. O setor é reconhecido como sendo uma das indústrias mais consumidoras de recursos e por apresentar um fraco desempenho em termos de produtividade e de inovação. A tecnologia de Impressão 3D resume-se a uma nova forma de produção de peças volumétricas que, através de um equipamento autónomo, geralmente controlado por computador, reproduz objetos físicos de diversos materiais, camada por camada, tendo como base os respetivos modelos digitais 3D. Dado à sua forma de fabrico controlada, precisa e aditiva e, por isso, limpa e económica, a Impressão 3D tem sido testada nas mais diversas áreas da Construção, podendo vir a tornar-se, um dia, na solução para muitos dos problemas apontados.

Por esta razão, o estudo realizado no âmbito da presente dissertação focou-se nas potencialidades que esta nova tecnologia pode ter para a Indústria da Construção, tendo sido primeiramente explorados os principais conceitos e fundamentos práticos inerentes à Impressão 3D e, mais tarde, expostos alguns exemplos da sua aplicação neste setor industrial. Desta forma, foi possível perceber como esta tecnologia pode potenciar muitas técnicas inovadoras e favoráveis a este setor, particularmente nos ramos da prototipagem, da pré-fabricação e da reabilitação, e até mesmo em toda a produção da construção de edifícios.

Adicionalmente, com base na investigação anteriormente realizada, foram selecionados quatro casos de estudo de possíveis aplicações com especial interesse para empresas de construção civil ou de pré-fabricação e estas foram testadas com recurso a uma impressora 3D FDM (Modelagem por Deposição de Material Fundido) de baixo custo, segundo o fluxo de trabalho simples das tecnologias de Fabricação Aditiva estudadas. Foram também descritas todas as fases de preparação dos modelos 3D dos objetos escolhidos, bem como da impressora 3D, com o intuito de fornecer um guia claro e acessível com as instruções e informações necessárias para imprimir tridimensionalmente com sucesso pequenas peças funcionais ou experimentais e, com os resultados obtidos, provar que esta tecnologia pode tornar-se numa alternativa a um leque de procedimentos tradicionais na Construção, tornando-os mais eficientes e otimizados.

Com o estudo realizado, foi igualmente comprovado que não é necessário realizar um investimento demasiado dispendioso para o setor começar a apostar e a utilizar com sucesso técnicas de Impressão 3D no seu dia-a-dia e como ferramenta pessoal. Por outro lado, para isso é indispensável uma atualização dos currículos dos engenheiros civis que integre a modelação digital 3D, dado que esta é uma das fases mais importantes e exaustivas que a Impressão 3D requer. Por fim, a presente dissertação conclui que esta tecnologia inovadora irá certamente proporcionar fortes mudanças na Construção, uma vez que esta responde a várias questões-chave que têm impedido a evolução tecnológica deste setor.

PALAVRAS-CHAVE: IMPRESSÃO 3D; CONSTRUÇÃO; EXEMPLOS DE APLICAÇÃO; PROCESSO DE TRABALHO;

ABSTRACT

Currently, addressing the applicability of 3D Printing in Construction is inevitable. The sector is recognized for being one of the most resource-consuming industries and for presenting a poor performance in terms of productivity and innovation. 3D Printing technology boils down to a new way of producing volumetric pieces that, through autonomous equipment that usually is controlled by computer, reproduces physical objects of different materials, layer-by-layer, based on 3D digital models. Given its controlled, precise and additive form of manufacture, this turns it in a cleaner and economical process of fabrication. 3D printing has been tested in the most diverse areas of Construction, and one day may become the solution to many of the problems mentioned.

For this reason, the study carried out within the scope of this dissertation focused on the potential that this new technology may have for the Construction Industry, by firstly explore the main concepts and practical foundations of 3D printing. Later it was exposed some examples of its application in this industrial sector. In this way, it was possible to see how this technology can enhance many innovative and favourable techniques for this sector, particularly in the fields of prototyping, prefabrication and rehabilitation, and even in the whole production of buildings constructions.

Additionally, based on the research previously carried out, four case studies of possible applications with special interest for civil construction or prefabrication companies were selected and tested using a low cost 3D FDM (Fused Deposition Modelling) printer, according to the simple workflow of the Additive Manufacturing technologies studied. All preparations steps of the chosen 3D models were also described, as well as the 3D printer, in order to provide a clear and accessible guide with the necessary instructions and information to successfully print small functional or experimental products and the obtained results prove that this technology can actually become an alternative to a range of traditional Construction processes, making them more efficient and optimized.

With the study carried out, it was also proven that it is not necessary to make an expensive investment by the sector to start using 3D printing techniques successfully in daily lives and as a personal tool. On the other hand, it is essential to update the curricula of civil engineers to integrate 3D digital modelling, as this is one of the most important and exhaustive phases that 3D printing requires. Finally, this study concludes that this innovative technology will certainly provide strong changes in Construction, because it answers several key questions that have prevented the technological evolution of this sector.

KEYWORDS: 3D PRINTING; CONSTRUCTION; APPLICATION EXAMPLES; WORK PROCESS;

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	III
ABSTRACT	V
1 INTRODUÇÃO	1
1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO	1
1.2. MOTIVAÇÃO	2
1.3. OBJETIVOS.....	2
1.4. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	3
2 ESTADO DE ARTE	5
2.1. INTRODUÇÃO À IMPRESSÃO 3D	5
2.1.1. EVOLUÇÃO DO CONCEITO	5
2.1.2. TECNOLOGIAS DE IMPRESSÃO 3D	6
2.1.3. FLUXO DE TRABALHO	9
2.1.4. PROCESSAMENTO.....	9
2.1.4.1. Otimização do Espaço	10
2.1.4.2. Planeamento do Formato do Modelo.....	11
2.1.4.3. Modelação CAD 3D.....	12
2.1.4.4. Conversão para o Formato STL.....	13
2.1.4.5. Parâmetros de Impressão	14
2.2. APLICAÇÕES DE IMPRESSÃO 3D NA CONSTRUÇÃO	17
2.2.1. PROTÓTIPOS DE EDIFÍCIOS	18
2.2.2. COMPONENTES E LIGAÇÕES METÁLICAS.....	19
2.2.3. ELEMENTOS CONSTRUTIVOS	21
2.2.4. REABILITAÇÃO DE EDIFÍCIOS	26
2.2.5. ESTRUTURAS PRÉ-FABRICADAS.....	29
2.2.6. ESTRUTURAS DE BETÃO <i>IN SITU</i>	30
3 DEFINIÇÃO DOS CASOS DE ESTUDO.....	34
3.1. RECURSOS TECNOLÓGICOS DISPONÍVEIS	34
3.1.1. IMPRESSORA E AS SUAS PROPRIEDADES	34
3.1.1.1. Principais Componentes	35
3.1.1.2. Especificações Básicas.....	37
3.1.1.3. Filamentos Compatíveis.....	37
3.1.2. PROGRAMAS DE PROCESSAMENTO	44

3.1.2.1. Programas de Modelação 3D	45
3.1.2.2. Programa de Laminação	47
3.2. CASOS DE ESTUDO – APLICAÇÕES NA CONSTRUÇÃO	51
3.2.1. CRITÉRIOS DE SELEÇÃO	52
3.2.2. CASOS DE ESTUDO	52
4 PROCEDIMENTOS PARA IMPRESSÃO 3D DOS CASOS DE ESTUDO	61
4.1. PRÉ-PROCESSAMENTO	61
4.1.1. MODELAÇÃO DE OBJETOS 3D NO <i>AUTOCAD</i>	61
4.1.2. MODELAÇÃO DE OBJETOS 3D NO <i>REVIT</i>	62
4.1.3. NOTAS PARA MODELAÇÃO 3D DIRECIONADA PARA IMPRESSÃO 3D	63
4.1.4. MODELOS CAD 3D DOS PROTÓTIPOS DOS CASOS DE ESTUDO	64
4.1.5. DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS DE IMPRESSÃO.....	67
4.1.5.1. Configurações Antes da Laminação dos Modelos.....	68
4.1.5.2. Configurações dos Filamentos.....	69
4.1.5.3. Procedimento Após Laminação Dos Modelos	70
4.2. IMPRESSÃO 3D DOS PROTÓTIPOS DOS CASOS DE ESTUDO.....	71
4.2.1. CALIBRAÇÕES NA IMPRESSORA 3D.....	71
4.2.2. PROCESSAMENTO PARA IMPRESSÃO 3D.....	73
5 TESTES E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	75
5.1. TESTES DE IMPRESSÃO 3D DOS MODELOS DOS CASOS DE ESTUDO	75
5.1.1. ACESSÓRIOS DE COFRAGENS	75
5.1.2. ACESSÓRIOS DE TUBAGENS.....	79
5.1.3. ACESSÓRIOS DE CAIXILHOS	83
5.1.4. CANTOS DE RODAPÉS	85
5.2. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	87
5.2.1. PRECISÃO DIMENSIONAL	87
5.2.2. QUALIDADE DOS ACABAMENTOS	88
5.2.3. TEMPO DE IMPRESSÃO	90
5.2.4. CUSTOS DE PRODUÇÃO.....	91
6 CONCLUSÕES FINAIS E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS DA IMPRESSÃO 3D NA CONSTRUÇÃO	94
6.1. CONCLUSÕES FINAIS	94
6.1.1. PREPARAÇÃO DOS MODELOS 3D	94
6.1.2. IMPRESSÃO DOS MODELOS 3D	96

6.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS DA IMPRESSÃO 3D NA CONSTRUÇÃO.....	97
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	101
ANEXO.....	108
A: DESENHOS TÉCNICOS.....	109
A1: COGUMELOS DE PROTEÇÃO.....	109
A2: ESPAÇADORES DE COFRAGENS	109
A3: JUNTA DE UNIÃO E TUBO	110
A4: CANTOS DE RODAPÉS	111

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Protótipo e Produto Final [3].....	5
Figura 2 - Esquema ilustrativo da tecnologia SLA [7].....	6
Figura 3 - Esquema ilustrativo da tecnologia FDM [9].....	7
Figura 4 - Esquema ilustrativo da tecnologia SLS [11].....	7
Figura 5 - Esquema ilustrativo da tecnologia BJ [14].....	8
Figura 6 - Fluxo de trabalho da Impressão 3D [17].....	9
Figura 7 - Estruturas celulares para otimização do espaço e impressão [15].....	10
Figura 8 - Prótese de uma mão [15].....	12
Figura 9 - Alinhadores para montagem de peças [21].....	12
Figura 10 - Exemplo de um modelo CAD 3D no <i>SolidWorks</i> [22].....	12
Figura 11 - Representação do modelo no formato <i>STL</i> [20].....	13
Figura 12 - Interpretação do formato <i>STL</i> [20].....	13
Figura 13 - Diferentes orientações da mesma peça [26].....	14
Figura 14 - Exemplo de um modelo fatiado no <i>Simplify3D</i> [15].....	15
Figura 14 - Estruturas de suporte [29].....	15
Figura 16 - Exemplos de caminhos de impressão diferentes [30].....	16
Figura 17 – Modelo impresso antes e depois do pós processamento [31].....	17
Figura 18 - Impressão 3D no âmbito da saúde [35].....	17
Figura 19 - Modelo estrutural impresso e o seu modelo digital CAD 3D [40].....	19
Figura 20 - Modelo CAD 3D e protótipo à escala real do nó <i>Nematox</i> [42].....	20
Figura 21 – Evolução desde o nó metálico tradicional até aos dois protótipos impressos em 3D da <i>ARUP</i> [42].....	21
Figura 22 - Tijolo <i>Cool Brick</i> da <i>Emerging Objects</i> [45].....	22
Figura 23 - Esquema de funcionamento do processo de evaporação dos <i>Cool Brick</i> [45].....	22
Figura 24 - Torre construída com os tijolos de terracota com <i>design</i> exclusivo da <i>Sino</i> [44].....	23
Figura 25 - Parede à base de terra impressa com escadas de madeira embutidas e respetivo padrão de impressão [46].....	24
Figura 26 - <i>Banyan Eco Wall</i> do departamento de pesquisa e inovação <i>NOWLAB</i> [47].....	24
Figura 27 - Estrutura celular impressa com espuma cerâmica [49].....	25
Figura 28 – Blocos de espumas de Isolamento Térmico à base de cortiça impressas em 3D [50].....	26
Figura 29 - Processo de moldagem e diferentes peças de betão moldadas [52].....	27
Figura 30 - Segmento de uma das caixilharias de betão, depois de ser retirado da cofragem impressa em 3D [53].....	28

Figura 31 - Esquema do processamento da impressão das cofragens da <i>NOWLab</i> [53].....	28
Figura 32 - Módulo pré-fabricado e impresso da <i>Haus</i> . pronto para entrega [54].....	29
Figura 33 – 2 Módulos pré-fabricados e impressos da <i>Haus</i> no local da entrega [54].....	29
Figura 34 - Ilustração do método de impressão <i>Countour Crafting</i> [57].....	30
Figura 35 - Casas de isolamento social de emergência impressas em 24 horas da <i>Winsun</i> [60].....	31
Figura 36 - Impressora 3D: <i>Original Prusa i3 MK3S</i> [62].....	33
Figura 37 - Esquema ilustrativo do movimento de uma impressora 3D Cartesiana [62].....	34
Figura 38 – Esquema ilustrativo da cabeça de impressão [62].....	35
Figura 39 - Plataforma aquecida; Armação; Motor de passos; Placa principal [62].....	35
Figura 40 - Exemplo da dissolução das estruturas de suporte em HIPS [65].....	43
Figura 41 – Influência da altura das camadas no acabamento das superfícies e no tempo de impressão [62].....	47
Figura 42 – Influência do número de perímetros na configuração da peça [62].....	47
Figura 43 - Influência no padrão de preenchimento consoante sua densidade [62].....	48
Figura 44 – Exemplos de objetos com pontes, borda, saia e sob jangada [62].....	49
Figura 45 - Espaçamento mínimo entre armaduras (S); Recobrimento nominal (C) [75].....	52
Figura 46 - Espaçador pontual para armaduras horizontais [75].....	53
Figura 47 - Espaçador circular para armaduras verticais [75].....	53
Figura 48 - Cogumelos de plásticos de sinalização [78].....	54
Figura 49 - Acessórios de tubagens em PVC [79].....	55
Figura 50 - Canto de caixilharia com corte térmico [83].....	56
Figura 51 - Caixilho de porta telescópica [84].....	57
Figura 52 - Caixilho de cabine de chuveiro [85].....	57
Figura 53 - Roda-macas aplicado num hospital [86].....	58
Figura 54 - Exemplos de rodapés com diferentes formas e materiais [87].....	58
Figura 55 - Tipos de modelos 3D no programa <i>AutoCAD</i> [89].....	61
Figura 56 - Técnicas de modelação 3D no programa <i>AutoCAD</i> [90].....	62
Figura 57 - Modelos CAD 3D de cogumelos de proteção de varões de aço.....	65
Figura 58 - Modelos CAD 3D de espaçadores de cofragens para armaduras horizontais.....	65
Figura 59- Modelos CAD 3D dos acessórios de instalações hidráulicas adquiridas.....	66
Figura 60 - Modelos CAD do tubo reto e da junta de união.....	66
Figura 61 - Modelo CAD 3D do canto do caixilho de chuveiro.....	67
Figura 62 - Modelo CAD 3D de fecho de correr.....	67
Figura 63 - Modelos CAD 3D de cantos de rodapés.....	67

Figura 64 - Legenda das configurações realizadas nas peças no <i>PrusaSlicer</i>	68
Figura 65 – Legenda da janela de visualização do modelo fatiado e informações geradas no <i>PrusaSlicer</i>	70
Figura 66 - Calibração da primeira camada na impressora 3D [69].....	72
Figura 67 - Forma aconselhada para a espessura da primeira camada pelo fabricante da impressora [69].....	72
Figura 68 - Ecrã LCD de controlo da impressora 3D [69].....	73
Figura 69 - Forma correta de remover as peças impressas da placa de aço removível [69].....	73
Figura 70 – Modelo laminado do cogumelo no <i>PrusaSlicer</i> disposto sob a sua parte superior.....	75
Figura 71 – Resultado da primeira Impressão 3D do cogumelo, com muitas irregularidades.....	75
Figura 72 – Modelo laminado do cogumelo no <i>PrusaSlicer</i> disposto sob a sua base.....	76
Figura 73 - Resultado da segunda Impressão 3D do cogumelo.....	76
Figura 74 - Resultado da Impressão 3D do espaçador 1 (cavalete).....	77
Figura 75 - Resultado da Impressão 3D do espaçador 2 (cruzamento).....	77
Figura 76 - Visualização do modelo do espaçador 1 laminado no <i>PrusaSlicer</i>	78
Figura 77 - Visualização do modelo do espaçador 2 laminado no <i>PrusaSlicer</i>	78
Figura 78 - Visualização do modelo roscado da curva a 45° laminado no <i>PrusaSlicer</i>	79
Figura 79 - Resultado da Impressão 3D da curva a 45°, com muitas irregularidades.....	79
Figura 80 - Visualização do modelo do tê a 45° laminado no <i>PrusaSlicer</i>	79
Figura 81 - Resultado da Impressão 3D do tê a 45°, com algumas irregularidades.....	79
Figura 82 - Visualização do modelo do tê a 90° laminado no <i>PrusaSlicer</i>	80
Figura 83 - Resultado da Impressão 3D do tê a 90°, com muitas irregularidades.....	80
Figura 84 - Visualização do modelo da curva a 45° roscada laminada no <i>PrusaSlicer</i>	81
Figura 85 - Resultado da Impressão 3D da curva a 45° roscada, com acabamento melhorado.....	81
Figura 86 - Resultado da Impressão 3D da junta de união com os contornos facetados.....	82
Figura 87 - Resultado da Impressão 3D da junta de união demasiado pequena.....	82
Figura 88 - Visualização do modelo da junta de união e tubo laminados no <i>PrusaSlicer</i>	82
Figura 89 - Visualização do modelo da segunda junta de união no <i>PrusaSlicer</i>	82
Figura 90 - Visualização dos modelos laminados que constituem um canto de caixilho no <i>PrusaSlicer</i>	84
Figura 91 - Resultado da Impressão 3D do canto de caixilho, com as peças já coladas.....	84
Figura 92 - Visualização dos modelos laminados que constituem um fecho de correr no <i>PrusaSlicer</i>	84
Figura 93 - Resultado da Impressão 3D das peças constituintes do fecho de correr.....	84
Figura 94 – Fecho montado e aparafusado, completamente funcional.....	85

Figura 95 - Visualização dos modelos laminados de cantos de rodapés no <i>PrusaSlicer</i>	86
Figura 96 - Resultado da Impressão 3D dos rodapés em ABS.....	86
Figura 97 - Peças impressas da junta de união e tubo perfeitamente encaixadas e seladas.....	88
Figura 98 - Anel de borracha utilizado para selar a junção das duas peças.....	88
Figura 99 - Curva a 45° impressa com demasiadas estruturas de suporte.....	89
Figura 100 - Curva a 45° após terem sido retiradas as estruturas de suporte.....	89
Figura 101 - Peças do fecho de correr a serem impressas com bordas.....	89
Figura 102 - Efeito de contração das primeiras camadas depositadas com ABS.....	90
Figura 103 - Primeiras camadas depositadas em ABS a aderirem perfeitamente à placa de aço removível.....	91
Figura 104 - Exemplo de aplicação dos espaçadores pontuais de varões de aço [94].....	92
Figura 105 - Exemplo de aplicação dos espaçadores de cruzamento de varões de aço [95].....	92
Figura 106 – Vista em planta dos modelos CAD dos Cogumelos de Proteção.....	107
Figura 107 – Vista em alçado dos modelos CAD dos Cogumelos de Proteção.....	107
Figura 108 – Vista em planta dos modelos CAD dos Espaçadores.....	107
Figura 109 – Vista em alçado dos modelos CAD dos Espaçadores.....	108
Figura 110 – Vista em planta dos modelos CAD da Junta de União e Tubo.....	108
Figura 111 – Vista em alçado dos modelos CAD da Junta de União e Tubo.....	108
Figura 112 – Vista em planta dos modelos CAD dos Cantos de Rodapés.....	109
Figura 113 – Vista em alçado dos modelos CAD dos Cantos de Rodapés.....	109

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Quadro síntese das características e requisitos do filamento de PLA [62], [63], [64]	38
Tabela 2 - Quadro síntese das características e requisitos do filamento de PETG [62], [63], [64]	39
Tabela 3 - Quadro síntese das características e requisitos do filamento de ABS [62], [63], [64]	40
Tabela 4 - Quadro síntese das características e requisitos do filamento de FLEX [62], [63], [64]	41
Tabela 5 - Quadro síntese das características e requisitos do filamento de Nylon [62], [63], [64]	41
Tabela 6 - Quadro síntese das características e requisitos do filamento de PC [62], [63], [64]	42
Tabela 7 - Quadro síntese geral das características e requisitos dos 6 filamentos principais de Impressão 3D [62], [63], [64]	43
Tabela 8 – Principais características dos <i>programas</i> de modelação 3D: <i>AutoCAD vs Revit</i> [66]	46
Tabela 9 - Configurações dos filamentos utilizados [63]	70
Tabela 10 – Informações sobre as configurações realizadas para os cogumelos de proteção e respetiva Impressão 3D	77
Tabela 11 - Informações sobre as configurações realizadas para os espaçadores e respetiva Impressão 3D	78
Tabela 12 - Informações sobre as configurações realizadas para os acessórios de tubagens em PLA e respetiva Impressão 3D	81
Tabela 13 - Informações sobre as configurações realizadas para os acessórios de tubagens em ABS e respetiva Impressão 3D	83
Tabela 14 - Informações sobre as configurações realizadas para o canto de caixilho e fecho de correr e respetiva Impressão 3D	85
Tabela 15 - Informações sobre as configurações realizadas para os cantos de rodapés e respetiva Impressão 3D	86

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

cm – Centímetro

∅ – Diâmetro

€ - Euro

kg - Quilograma

€/kg – Euro por Quilograma

g – Grama

° - Graus

°C – Graus Centígrados

h – Hora

% - Percentagem

m – Metro

m³ – Metro Cúbico

m² – Metro Quadrado

mm – Milímetro

mm/s – Milímetro por Segundo

mm/h – Milímetro por Hora

min – Minuto

2D – Duas Dimensões

3D – Três Dimensões

2.5D – Duas Dimensões E Meia

3DP – *Three Dimensional Print* ou *Three Dimensional Printing* (Impressão a três dimensões)

3MF – *Three-Dimensional Manufacturing Format*

ABS – *Acrylonitrile Butadiene Styrene*

AM – *Additive Manufacturing*

AMF - *Additive Manufacturing (file)*

BIM – *Building Information Modelling*

BJ – *Binder Jetting*

CAD – *Computer Aided Design*

CC – *Contour Crafting*

CE – Certificação Europeia

DXF – *Drawing Interchang Format*

EPS – Polistireno Expandido

FA – Fabricação Aditiva

FAMA – *Freeform and Additive Manufacturing Excellence*

FDM – *Fused Deposition Method*

FFF – *Fused Filament Fabrication*

FLEX – *Flex Materials*

HIPS – *High Impact Polystyren*

IC – Indústria da Construção, em inglês CI (*Construction Industry*)

IGES – Especificação Inicial de Troca de Gráficos

LM – *Layered Manufacturing*

OBJ – *Object (file)*

PA – *Polyamide*

PBF – *Powder Bed Fusion*

PC - *Polycarbonate*

PET – *Polyethylene Terephthalate*

PETG – *Polyethylene Terephthalate Glycol*

PLA – *Polylactic Acid*

PP - Polipropileno

PR – Protótipagem Rápida

PVA - *Polyvinyl Alcohol*

PVC - Policloreto de Vinila

RM – *Rapid Manufacturing*

RP – *Rapid Prototyping*

RT – *Rapid Tooling*

SL – *Stereolithography*

SLA – *Stereolithography Apparatus*

SLS – *Selective Laser Sintering*

STL (ficheiro) – *Stereolithography* ou *Standard Tessellation Language* ou *Standard Triangle Language*

TPE – *Thermoplastic Elastomer*

TPU – *Thermoplastic Polyurethane*

TPC – *Thermoplastic Copolyester*

UV – Ultravioleta

1

INTRODUÇÃO

1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO

Num século de mudanças constantes a nível técnico e tecnológico, abordar a questão da aplicação da Impressão 3D em muitas áreas do saber e do saber fazer é não só necessário como legítimo. Na Construção torna-se mesmo imprescindível no atual contexto socioeconómico, onde não só grassam as preocupações financeiras, mas também aquelas que envolvem os problemas de sustentabilidade. Daí considerar-se de maior relevância aproveitar uma tecnologia tão inovadora em benefício de um setor económico tão vasto, sem descurar uma nova forma de pensar a gestão de recursos: mais rigor na produção e no desempenho, menos desperdício e maior senso cívico. E o interessante é que a aplicação desta nova tecnologia, além de apresentar um potencial inestimável, pode estar ao alcance de todos, começando, por exemplo, com uma impressora 3D de baixo custo, que cabe perfeitamente em qualquer secretária.

Esta utilização da Impressão 3D de baixo custo tem-se expandido, beneficiando fundamentalmente de dois fatores: a cessação da validade das patentes da tecnologia de Impressão 3D FDM (Modelagem por Deposição de Material Fundido), que recorre à extrusão de plástico fundido na construção de objetos obtidos por sobreposições de camadas; e a consequente acessibilidade gratuita a todas as componentes integradas nas referidas patentes, que atualmente se encontram em código aberto, viabilizando assim a partilha destas informações através da Internet, bem como a sua livre modificação e partilha. Esta possibilidade acaba por disponibilizar não só desenhos de peças volumétricas como também as instruções dos programas necessários para a sua impressão, através da utilização de rolos de filamentos que podem ser tanto derivados de plástico biodegradável e ambientalmente sustentável, como o PLA, como de polímeros derivados de combustíveis fósseis, como o ABS. Existe, porém, de um modo geral, uma limitação neste tipo de impressoras 3D que se prende com a impossibilidade de imprimir objetos com uma dimensão superior a 20x20x20 cm, embora um objeto de maior dimensão possa ser obtido através da montagem de várias pequenas peças. Outras vantagens, não menos relevantes, são a redução de desperdício de materiais, relativamente àquele que existe na produção tradicional, e o facto de permitir uma produção mais personalizada e mais acessível, quer em termos de custos quer de tempo, abrindo portas a novos desenvolvimentos científicos que irão beneficiar áreas muito dependentes de outras indústrias, como é o caso da construção civil.

Por outro lado, não há qualquer dúvida de que as impressoras 3D profissionais e mais avançadas garantem melhores resultados, numa maior escala e com propriedades bastantes mais complexas, prevendo-se que a sua utilização em qualquer indústria se tornará revolucionária. Contudo, por enquanto, estas impressoras 3D ainda apresentam muitos constrangimentos, como os seus preços significativamente mais elevados e, sobretudo, porque a sua tecnologia e respetivos recursos não são de livre acesso e modificação, o que restringe muito a liberdade dos utilizadores de manusearem o equipamento sem formação adequada nesse sentido ou de fazer qualquer alteração ao seu código e forma

de processar. Já as impressoras 3D de baixo custo raramente são utilizadas a um nível profissional, embora cada vez mais se esteja a tornar na melhor ferramenta pessoal para qualquer ambiente industrial.

1.2. MOTIVAÇÃO

Tendo em conta as premissas apontadas, será fácil perceber que a motivação que se encontra por detrás do presente estudo se prende em grande parte com uma preocupação séria e atual com as questões da sustentabilidade do mundo da construção, sem negligenciar as suas questões económicas e financeiras.

Sabendo que a Indústria da Construção Civil é reconhecida como grande consumidora de recursos, tornando-a muito pouco amiga do ambiente, e ainda que apresenta um fraco desempenho em termos de produtividade e de inovação, a recente expansão da Impressão 3D e a sua incontestável aplicabilidade na construção tornou-se uma resposta apetecível para a resolução destes constrangimentos. Esta afirmação deve-se ao facto de que é potenciadora de um forte desenvolvimento na normalização, na diminuição do tempo de construção e dos seus custos assim como da mão-de-obra, muitas vezes subcontratada, e que é atualmente essencial para o efeito. No entanto, para que esta tecnologia seja efetivamente uma mais-valia nesta área de produção, torna-se urgente entender alguns obstáculos a ultrapassar e desafios a enfrentar, pelo facto de esta tecnologia na construção assumir ainda um carácter fragmentário. É então necessário que os seus responsáveis conheçam a história da tecnologia 3D, os seus fundamentos básicos e as suas potencialidades, para que brevemente seja possível imprimir em larga escala modelos completos de edifícios e seus constituintes, cumprindo os requisitos de personalização em massa e avaliando o custo do ciclo de vida dos projetos impressos.

1.3. OBJETIVOS

Para abrir a presente dissertação, procurou-se recolher e expor as informações mais relevantes sobre a origem e evolução do conceito de Impressão 3D, das diferentes tecnologias e dos modos de produção que daí surgiram e dos fundamentos práticos e comuns inerentes a todas as suas formas que possam permitir a iniciação do estudo desta ciência progressista. Foi também realizado um trabalho de investigação centrado em casos de aplicação de Impressão 3D na área da Indústria da Construção, de forma a compreender como esta tecnologia pode potenciar muitas técnicas inovadoras e favoráveis a este setor, nomeadamente nos ramos da prototipagem, da pré-fabricação e da reabilitação, e até mesmo na construção integral de edifícios.

Considerando todas as conceções e ideias provenientes da pesquisa exaustiva realizada neste âmbito e os recursos tecnológicos disponíveis para o presente estudo, que incluíram uma impressora 3D amadora e programas informáticos com licenças de estudante e que são correntemente utilizados no mercado da construção, foram selecionados quatro casos de estudo de possíveis aplicações com potencial interesse para empresas de construção civil ou de pré-fabricação, com o objetivo de serem concebidos e testados segundo o fluxo de trabalho simples das tecnologias de Fabricação Aditiva.

Para cada caso de estudo, foram descritas todas as etapas de preparação dos modelos 3D dos objetos testados via Impressão 3D, bem como as tarefas que foi necessário realizar para o seu processamento, com o intuito de fornecer um guia claro e acessível com as instruções essenciais para imprimir com sucesso pequenas peças funcionais ou experimentais, sem ocultar as dificuldades sentidas em todo o processo, assim como as soluções para as ultrapassar.

Finalmente, os resultados dos testes executados com a impressora 3D foram avaliados quanto à qualidade de produção das peças derivadas e foram analisados os respetivos valores quantitativos, tais como o tempo de impressão, a quantidade de material utilizado e o seu custo. Como complemento do estudo, foram estudadas várias formas de montagem, composição e união de objetos compostos, bem como estratégias de pós-processamento rápidas e de baixo custo.

Com o cumprimento dos objetivos mencionados, pretendeu-se comprovar que não é necessário realizar um investimento demasiado dispendioso para o setor começar a aprender e a utilizar com sucesso técnicas de Impressão 3D e que estas podem, de facto, ser uma alternativa a um leque de procedimentos tradicionais, tornando-os mais eficientes e otimizados.

1.4. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O trabalho realizado no âmbito da presente dissertação foi dividido em cinco capítulos. O primeiro consiste na Introdução ao tema abordado ao longo de estudo, a aplicação da Impressão 3D na Construção, o que inclui o seu enquadramento nos dias de hoje e o seu emergente potencial para os todos os setores industriais. As motivações que levaram à escolha deste tema, bem como os objetivos traçados para a sua concretização foram também descritos no capítulo introdutório.

O capítulo 2 constitui o *Estado de Arte* do tema escolhido e, por isso, nele foram apresentados os principais conceitos e matérias relacionadas com a Impressão 3D, desde a sua origem até ao seu estado atual, assim como a investigação realizada acerca das mais recentes aplicações desta tecnologia no setor da construção, que serviu para compreender como e de que formas pode ser aplicada nesta especialidade da engenharia civil.

O terceiro capítulo, *Definição dos Casos de Estudo*, descreve e analisa todos os recursos tecnológicos disponíveis para a realização do estudo prático de Impressão 3D na atual dissertação, de modo a que a escolha das aplicações a testar fossem baseadas nas capacidades reais do equipamento disponibilizado e nos materiais compatíveis com este, utilizando apenas programas informáticos gratuitos e de fácil acesso. Assim, após terem sido expostas e explicadas as condições de trabalho, foram apresentados alguns exemplos de aplicações de Impressão 3D nas áreas da Indústria da Construção e da Pré-Fabricação e foram definidos quatro casos de estudo para serem impressos em 3D. Estes foram previamente estudados para que se compreendesse o modo atual de fabrico das peças sugeridas, o seu funcionamento, as suas características e as suas exigências de desempenho normativas, e perceber se a utilização da Impressão 3D como forma de fabrico pode proporcionar ou não vantagens e benefícios na produção de peças relacionadas com a Construção.

Já o quarto capítulo, designado por *Procedimentos para Impressão 3D dos Casos de Estudo*, pormenoriza todas as etapas que foram necessárias executar para a Impressão 3D das peças escolhidas, desde a sua modelação digital 3D, da preparação dos modelos 3D para impressão, até à sua impressão propriamente dita.

No capítulo 6, *Testes e Discussão dos Resultados*, os resultados obtidos foram apresentados e analisados, qualitativa e quantitativamente, e foram apontadas as principais dificuldades que surgiram ao longo de todo o procedimento experimental e algumas soluções para as ultrapassar.

Por fim, no último capítulo, *Conclusões Finais E Desenvolvimentos Futuros da Impressão 3D na Construção*, como o próprio nome indica, são expostas as conclusões retiradas de toda a investigação e testes práticos realizados ao longo do estudo elaborado, sobre a aplicabilidade da Impressão 3D na construção, assim como são apresentadas algumas reflexões sobre possíveis desenvolvimentos futuros desta tecnologia na sua relação com a engenharia civil.

2 ESTADO DE ARTE

2.1. INTRODUÇÃO À IMPRESSÃO 3D

2.1.1. EVOLUÇÃO DO CONCEITO

A tecnologia de impressão de modelos tridimensionais, de forma rápida e através de modelação digital, inicialmente designada por Prototipagem Rápida (*Rapid Prototyping*, RP) tinha como objetivo a apresentação de um protótipo de um produto, ou parte dele, para mais tarde ser concebido e comercializado [1].

Sendo que a definição de protótipo é o primeiro exemplar de um objeto que tem sido ou será replicado, um modelo a ser desenvolvido ou uma versão preliminar, este torna-se um elemento fundamental na criação ou no progresso do desenvolvimento de um produto. Por outro lado, na área da engenharia, um protótipo designa uma aproximação de um produto, de um sistema ou dos seus componentes, na forma física ou virtual, a um determinado propósito definido na sua implementação [2].

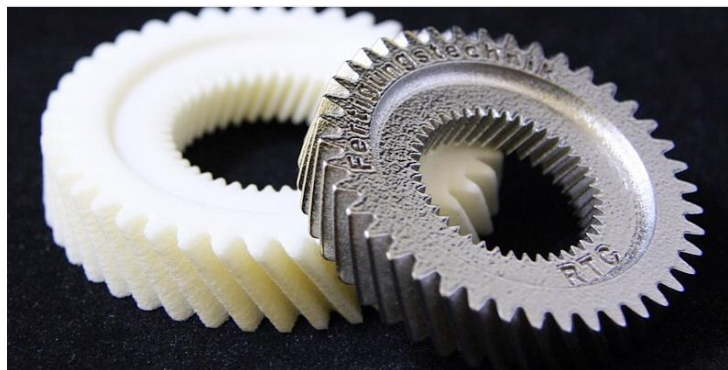


Figura 9 - Protótipo e Produto Final [3]

Os especialistas, de diversas áreas industriais, descrevem o processo de Prototipagem Rápida como sendo uma solução prática para testar novos conceitos num determinado produto, realizar ensaios necessários, provar a sua viabilidade e obter o respetivo parecer por parte de potenciais clientes ou outros agentes interessados. Contudo, a principal vantagem deste novo modo de desenvolvimento de produto é a capacidade de criar amostras físicas diretamente a partir de informação digital, mais concretamente através de programas informáticos CAD (*Computer Aided Design*, que significa “desenho auxiliado por computador”), o que permite simplificar e acelerar todo o processo de produção de objetos tridimensionais complexos [1].

Já o termo Fabricação Rápida (*Rapid Manufacturing*, RM) é empregue quando são utilizados equipamentos de Prototipagem Rápida para conceber diretamente os produtos finais, isto é, os produtos que serão efetivamente aproveitados ou comercializados. Outros termos empregues na literatura, consoante o tipo de técnicas aplicadas, são, por exemplo, Fabricação Aditiva (*Additive Manufacturing*, AM) e Fabricação de Formas Livres Sólidas (*Freeform and Additive Manufacturing Excellence*, FAME).

Assim, percebe-se que o atual conceito de Impressão 3D abrange uma série de métodos que oferecem um vasto espectro de recursos para o fabrico de peças e produtos em diferentes materiais. O que, fundamentalmente, estes têm em comum é o processo aditivo, isto é, como os objetos são fabricados: sem recurso a métodos subtrativos (começando com um bloco e recortando-o até obter a forma desejada) nem a processos de moldagem ou fundição, mas sim diretamente, construindo-os camada sobre camada [4].

2.1.2. TECNOLOGIAS DE IMPRESSÃO 3D

No ano de 1987, o método de Fabricação Aditiva foi começando a ser acessível ao público, com a introdução do processo de Esterelitografia, da empresa *3D Systems*. A partir daí, a tecnologia foi gradualmente evoluindo, de uma forma mais acelerada, desde a introdução de sistemas alternativos à Esterelitografia em 1991 e mesmo até à comercialização de impressoras 3D de baixo custo, em 1996 [5].

Atualmente, existem já várias técnicas de Fabricação Rápida ou Aditiva no mercado, que são exploradas globalmente por diferentes tipos de indústrias, sendo que as quatro mais assíduas são:

- ✓ **Esterelitografia** (*Stereolithography*, SLA): utilização dum recipiente em forma de tanque preenchido com resina de fotopolímeros líquida, onde uma plataforma horizontal móvel é imersa até uma profundidade equivalente à espessura de uma camada. De seguida, são emitidos *lasers* com radiação UV de forma a ativar quimicamente a resina, solidificando-a. A plataforma é então recolhida até uma altura em que a camada seguinte é construída sobre a primeira, e assim por diante [6], [4].

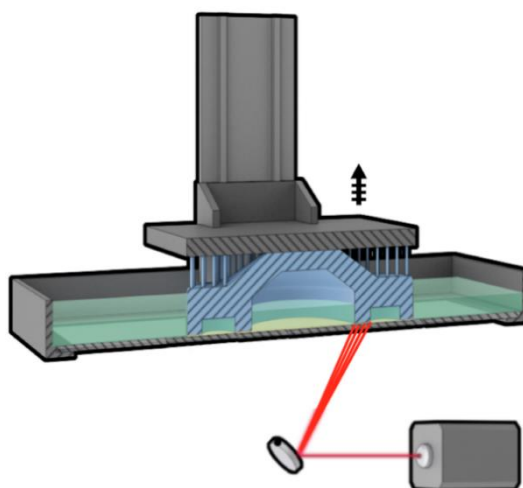


Figura 10 - Esquema ilustrativo da tecnologia SLA [7]

- ✓ **Modelagem por Deposição de Material Fundido** (*Fused Deposition Modelling*, FDM): lançamento de filamentos muito finos de resina termoplástica aquecida sobre uma plataforma de construção, onde são depositados controladamente com recurso a um bico extrusor. Quando os filetes de plástico quente se fundem com a estrutura existente, estes endurecem à medida que vão arrefecendo [4], [8].

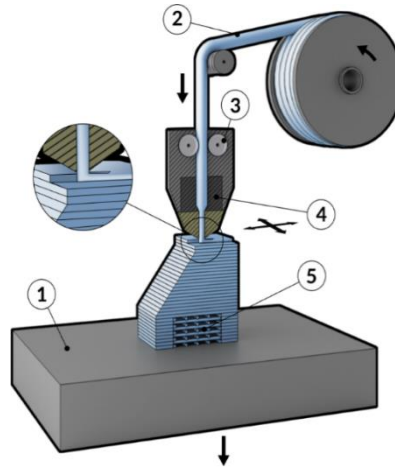


Figura 11 - Esquema ilustrativo da tecnologia FDM [9]

- ✓ **Sinterização Seletiva a Laser** (*Selective Laser Sintering*, SLS): utilização de um *laser* para derreter e aglutinar parcial e sucessivamente partículas de pó, que são depositadas sobre uma plataforma na configuração de camada. O *laser* tem como alvo as áreas que se pretendem solidificar, constituindo assim o formato do elemento final. Desta forma, o pó não aglutinado serve de suporte às partes suspensas da peça [4], [10].

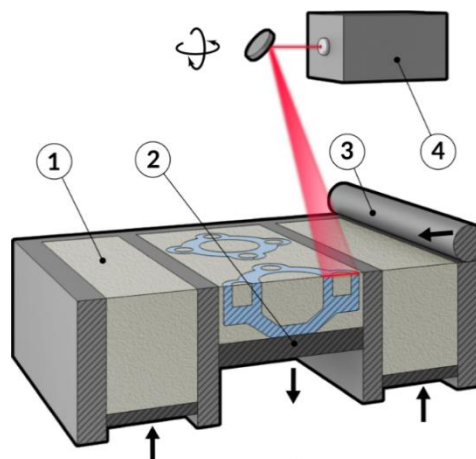


Figura 12 - Esquema ilustrativo da tecnologia SLS [11]

- ✓ **Jato de Aglutinante (Binder Jetting, BJ):** emprego da tecnologia de impressão a jato de tinta (impressão 2D). Neste caso, o jato expõe e deposita seletivamente um aglutinante líquido, geralmente à base de ligas metálicas ou polímeros, numa camada de pó, formando assim uma massa homogênea que rapidamente se solidifica. Similarmente à tecnologia SLS, o pó que não reage quimicamente com o aglutinante atua como apoio às peças criadas, podendo este ser reutilizado noutro projeto, quando concluído o processo [4], [12], [13].

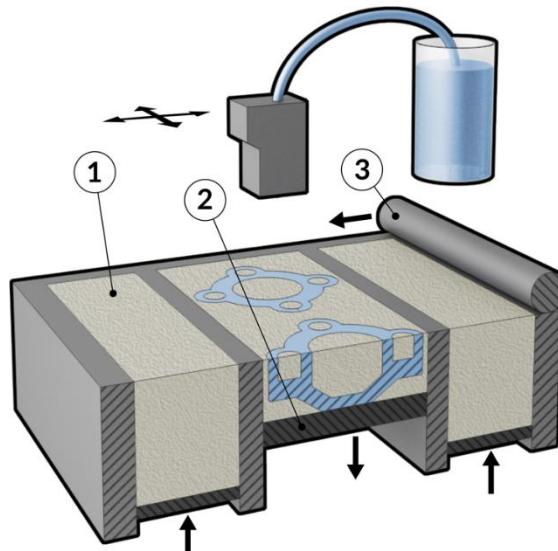


Figura 13 - Esquema ilustrativo da tecnologia BJ [14]

Existem diferentes formas de classificar todos os sistemas de PR, dado que existe uma grande e variada gama de tecnologias que, nos dias de hoje, já é possível utilizar. Contudo, segundo os autores do livro “*Rapid Prototyping – Principles and Applications*” (Prototipagem Rápida – Princípios e Aplicações), de Chua, Leong & Lim, a forma mais coerente de o fazer é categorizá-las de acordo com o estado físico inicial do material empregue no sistema, isto é, o material com que o produto ou as suas peças serão efetivamente construídos. Assim, é possível organizar os diferentes processos de FR em 3 classes, sendo cada uma delas à base de diferentes materiais [2]:

- 1) material líquido: através de um processo geralmente designado por cura, que converte o material no estado líquido em estado sólido, como é o caso da Esterelitografia.
- 2) material sólido: através de técnicas que abrangem todas as formas físicas de materiais em estado sólido, com a exceção do pó. Tendo isto em consideração, é completamente viável utilizar materiais sólidos com diferentes formas, desde filamentos, rolos, peças laminadas e pastilhas. É o caso da tecnologia FDM.
- 3) material em pó: apesar de o pó ser tecnicamente um material em estado sólido, este é separado dessa categoria, o que significa que esse material será de facto granulado. Este é empregue, por exemplo, em tecnologias do tipo SLS e BJ.

Em princípio, todos os materiais podem ser manufaturados com recursos a técnicas de Impressão 3D, apesar de nem todos serem compatíveis com as diferentes tecnologias existentes. Tanto podem ser utilizados areias, como metais, cerâmicos, comida, células vivas, plásticos ou até mesmo resíduos industriais. Os plásticos são usualmente utilizados em impressoras amadoras (à base de pós) que podem

ser oriundos de combustíveis fósseis ou matérias-primas de origem biológica. Neste sentido, uma série completa de (bio)plásticos está em fase de desenvolvimento em combinação com processos (bio)aditivos para criar novas propriedades de interesse ambiental. Em termos de características físicas e químicas, para a Impressão 3D, é ainda de ter em conta a temperatura de fusão do material, a sua viscosidade de fusão e o tempo de coagulação do mesmo [13].

2.1.3. FLUXO DE TRABALHO

De um modo geral, todas as técnicas de Impressão 3D exigem a concretização de várias tarefas até se obter o produto final, ao contrário do que acontece na Impressão 2D, em que não são necessários tantos passos por parte do utilizador para imprimir o que se deseja. Assim, será essencial a preparação de todo o processo, antes da impressão propriamente dita [15].

Em primeiro lugar, e depois da ideia inicial estar completamente concebida, será necessário elaborar ou adquirir, em formato digital, o modelo tridimensional que se pretende imprimir, a partir de uma plataforma de modelação CAD ou de um objeto real, através de um aparelho de digitalização 3D.

Posteriormente, será indispensável converter o modelo digital para um ficheiro com o formato *.stl* (formato de SLS, a primeira técnica de impressão concebida) ou *.amf* (formato de FA), um formato mais atual não muito utilizado, mas com capacidade de suportar mais informação dentro do ficheiro.

Já num dos formatos referidos, e através de um programa informático de laminação, o modelo 3D será dividido em camadas (um processo designado *Slicing*, em inglês). Após este passo, o ficheiro terá de ser traduzido para a linguagem de programação *G-code*, que será aquela para a qual o equipamento de impressão estará preparado, a fim de interpretar e executar de forma a reproduzir o modelo fisicamente.

O ficheiro será enviado na linguagem supracitada para o computador da máquina e esta terá ainda de ser configurada por parte do utilizador. Após a impressão, na maioria dos casos, é necessário realizar a limpeza do equipamento e as tarefas de pós-processamento respeitantes a tratamentos de acabamento que alguns elementos impressos exigem [15], [16].

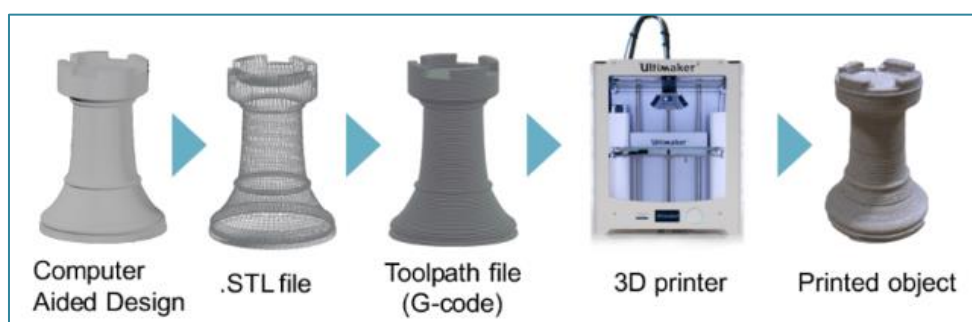


Figura 14 - Fluxo de trabalho da Impressão 3D [17]

2.1.4. PROCESSAMENTO

São vários os desafios que têm de se ultrapassar para que o avanço de cada uma das etapas descritas anteriormente seja exequível. Contudo, se estes forem antecipadamente estudados, muitos erros e imprevistos podem ser acautelados, acelerando e facilitando o procedimento de Impressão 3D que, à primeira vista, pode parecer demasiado complexo [15].

2.1.4.1. Otimização do Espaço

Uma das principais razões pela qual os processos de PR são tão promissores é a sua resposta eficaz à necessidade de aplicar métodos mais eficientes, menos dispendiosos e mais ambientalmente conscientes, sem descuidar a qualidade do produto e a rapidez da respetiva produção. Cada vez mais, esta tecnologia é utilizada para ultrapassar os problemas inerentes ao desenvolvimento de protótipos a uma escala industrial que, geralmente, requerem a criação de ferramentas e componentes específicos para um determinado projeto, o que representa gastos consideráveis, tanto a nível económico como a nível de cumprimento de prazos, (muitas vezes não reutilizados), o que gera demasiado desperdício. Para enfatizar esta nova função da Impressão 3D, é utilizado o termo *Fabrico Rápido de Ferramentas (Rapid Tooling)* que proporciona a validação dos produtos em relação ao seu desempenho e não só em termos de aspetos visuais [18].

Sendo assim, um método de FR é tanto mais eficiente quanto mais otimizado for o espaço destinado à geometria do produto, pois reduz substancialmente a quantidade de material utilizado, o consumo de tempo e energia elétrica, bem como de impactos ambientais, o que consequentemente gera menores custos de produção [15].

De igual forma, também é bastante relevante conseguir otimizar o processo de preenchimento do interior das camadas, isto é, o delineamento do caminho de impressão, para que determinadas características do produto sejam efetivamente garantidas, tais como a resistência, a massa e o volume do mesmo. Entenda-se “caminho de impressão” como sendo a trajetória percorrida pelo meio de depósito do material, em qualquer técnica de FA. Assim, o planeamento desta trajetória inclui determinar a geometria ou topologia do padrão, programá-lo e determinar os parâmetros mais apropriados para o efeito [19], [20].

No entanto, são muitas as opções que existem para realizar uma distribuição aceitável do espaço de *design*, de modo a cumprir os requisitos previamente impostos para uma determinada peça, sendo que nem todas elas são inteiramente compatíveis com todas as tecnologias de Impressão 3D. Por isso, alguns imprevistos podem acontecer, desde o bloqueio de material a estruturas mal fabricadas, suportes inadequados ou até mesmo inexistentes [19].

Assim, para otimizar o processo de alocação do material impresso, recorre-se frequentemente a Estruturas Celulares, que são peças de maior dimensão e que contêm pequenos vazios com determinadas formas geométricas utilizadas para garantir o preenchimento de material onde é estritamente necessário, como é o caso de peças com a forma de favos de mel ou de treliças [15].



Figura 15 - Estruturas celulares para otimização do espaço e impressão [15]

2.1.4.2. Planeamento do Formato do Modelo

Uma vantagem exclusiva da Impressão 3D é o facto de esta conseguir criar geometrias complexas e funcionais, o que normalmente não acontece com outras técnicas de produção mais tradicionais. Por isso, sucedem-se outros benefícios aquando da utilização de métodos de FA, tais como a capacidade de criar peças com diferentes níveis hierárquicos, de montar sistemas totalmente funcionais a partir delas e de combinar diferentes materiais numa única peça. Contudo, para que estas funcionalidades resultem, é necessário adaptar os tradicionais projetos de FR e criar novas ferramentas, pois as que são utilizadas atualmente já não têm capacidade de resposta para todas as potencialidades da Impressão 3D [15].

Os programas CAD que são mais utilizados nos dias de hoje para a modelação 3D do produto tendem a ser bastante limitadores quando aproveitados para projetos de Impressão 3D. Estes não foram inicialmente criados para conceber geometrias com uma complexidade elevada, nem para realizar intervenções em certas características físicas do modelo, tendo apenas como objetivos a representação de limites e a modelação de elementos geométricos sólidos. Sem a capacidade de definir e representar os atributos físicos da composição do modelo, que providenciam a funcionalidade ao produto, é impossível transpor esse tipo de informação para os programas dedicados à Impressão 3D [1].

Outro constrangimento à execução de um projeto em Impressão 3D é a quantidade de materiais passíveis de implementação, que é bastante inferior em relação a outras formas de fabricação. Tal pode limitar a ideia inicial do projetista, caso o material escolhido não seja compatível com a tecnologia de Fabricação Aditiva disponível, sendo que assim será necessário encontrar uma outra solução, igualmente funcional. Contudo, como foi referido no ponto 1.3, durante os últimos anos este problema tem sido bastante estudado e o número de materiais viáveis para a Impressão 3D tem aumentado, pelo que se espera que, no futuro, esta limitação deixe de existir [16].

Por outro lado, o tamanho e as funcionalidades do equipamento de impressão também podem influenciar a complexidade de um projeto deste tipo. Caso as suas capacidades não sejam suficientes para produzir a peça na sua totalidade, quer por ser demasiado complexa ou demasiado grande, será necessário ter em conta uma série de reflexões para, então, ser possível a concretização do modelo.

Por exemplo, em alternativa à construção de uma peça única, é possível concebê-la recorrendo à impressão de vários componentes que podem ser montados posteriormente, formando assim a peça originalmente idealizada. Esta abordagem tanto resolve problemas associados a produtos de maior escala, como a produtos mais complexos, pois estes também podem ser construídos a partir de peças mais primitivas e mais acessíveis para a Impressão 3D. Neste sentido, será então necessário repensar o formato do produto e realizar o planeamento para a posterior junção das várias peças produzidas, o que, por vezes, pode afetar as especificações e aplicabilidade do produto final. São já vários os métodos que existem para efetuar este tipo de montagem, mas, até agora, não há nenhum que funcione de igual forma para todo o tipo de formas e dimensões. As duas imagens que se seguem demonstram duas técnicas de montagem. A primeira é uma prótese de uma mão, em que os elementos que a compõem estão interligados através de fios, e a segunda representa quatro formas de adicionar alinhadores nos componentes, que devem ser corretamente projetados, para mais tarde ser possível montá-los, encaixando-os [1], [15], [21].



Figura 8 – Prótese de uma mão impressa em 3D [15]

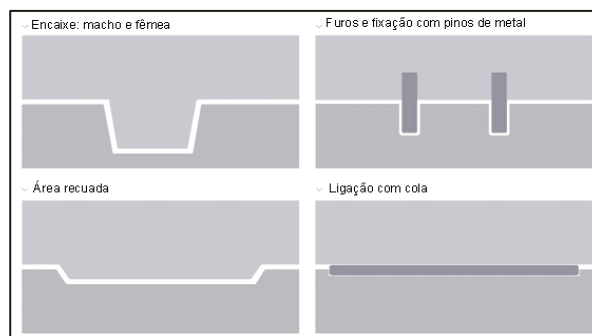
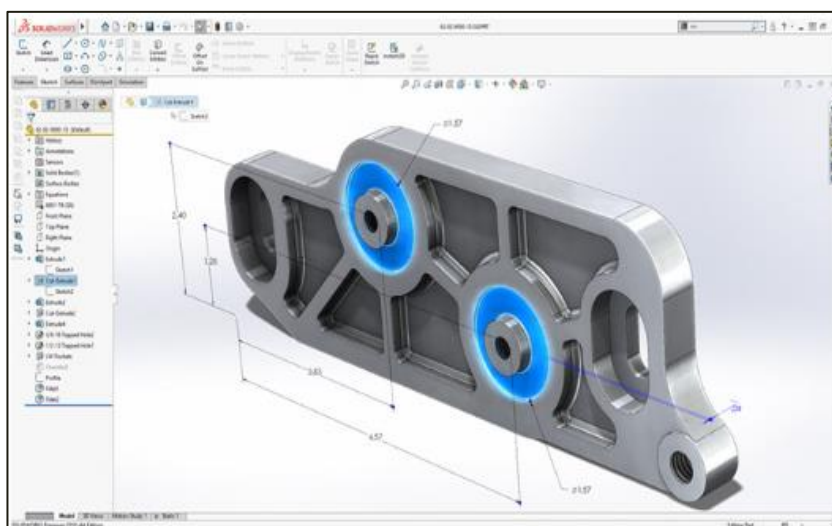


Figura 9 - Alinhadores para montagem de peças de encaixe [21]

2.1.4.3. Modelação CAD 3D

Após o planeamento do modo como será impresso o modelo e tendo em conta todos os desafios que são necessários atravessar para se obter o modelo pretendido, o próximo passo será a modelação do mesmo, a partir de um programa CAD 3D. Estes programas são concebidos como uma ferramenta técnica, altamente específica, para projetos industriais, mecânicos, de arquitetura e de várias outras engenharias. Dentro de um ficheiro CAD, estará incluída informação relativa a propriedades do material do modelo, as suas dimensões, tolerâncias e dados concretos do processo de fabricação. São já vários os programas disponíveis no mercado, desde os mais amadores, como por exemplo o *TinkerCAD*, o *FreeCAD* e o *BlocksCAD*, até aos mais profissionais, como o *Fusion360*, o *Solidworks* e o *Rhino* [23]. A modelação avançada é um pré-requisito nos processos de FA e, normalmente, é a etapa que mais tempo consome ao longo de todo o projeto [2], [22]. Assim que o modelo CAD 3D estiver pronto, já é possível iniciar as habituais etapas de FA. Contudo, estas não devem ser processadas de forma linear, pois é fundamental que certas alterações sejam realizadas no modelo CAD, iterativamente, consoante os resultados obtidos após cada uma das fases [23].

Figura 10 - Exemplo de um modelo CAD 3D no *SolidWorks* [22]

2.1.4.4. Conversão para o Formato STL

Como mencionado anteriormente, a próxima etapa será converter o ficheiro do modelo CAD para o formato STL o qual é geralmente a forma mais comum de enviar informação de um programa CAD para qualquer sistema de Impressão 3D. Este formato foi desenvolvido para ultrapassar dificuldades devidas à perda de informação inerentes ao formato IGES (Especificação Inicial de Troca de Gráficos) e, desde então, passou a ser um padrão de entrada para todas as tecnologias de FA. O modo de funcionamento desta conversão baseia-se na aproximação das superfícies do modelo 3D, usando triângulos planos de várias dimensões e criando uma representação facetada da geometria da peça. Cada um dos vértices (*vertex*) destes triângulos apoia-se segundo um referencial ortonormado de coordenadas XYZ e cada uma das suas superfícies segundo um vetor ortogonal (*surface normal*), do interior para o exterior do modelo [20].



Figura 11 - Representação do modelo no formato STL [20]

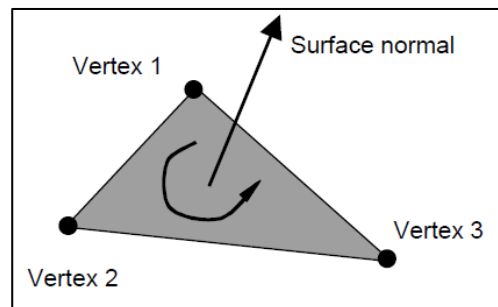


Figura 12 - Interpretação do formato STL [20]

Como este método realiza apenas a aproximação das superfícies de um modelo, é possível que surjam erros geométricos na superfície da peça, quando da conversão do modelo CAD para o formato STL, o que por sua vez provoca defeitos na peça fabricada. No entanto, existem já pacotes CAD que possuem opções de exportação integradas para que esses erros sejam minimizados ao máximo. Por outro lado, estes pacotes têm a desvantagem de aumentar o tamanho do ficheiro, o que leva a um aumento do tempo necessário para concretizar as tarefas de pré-processamento. Por isso, encontram-se em desenvolvimento, novas abordagens, como por exemplo, a conjugação de algoritmos de translação de vértices e de isolamento de facetas [24].

Por enquanto, na conversão do modelo CAD para STL, alguns problemas são expectáveis, tais como lacunas no modelo em forma de fendas, furos ou perfurações, facetas alteradas ou inexistentes, facetas sobrepostas e falta das condições de topologia da peça. Assim, deve sempre realizar-se uma verificação do ficheiro STL, quer a partir de um programa CAD ou durante a leitura do ficheiro no equipamento de impressão, pois sem efetuar as alterações devidas, não será possível concretizar um dos próximos passos do pré-processamento – a divisão do modelo em camadas – porque é provável que o modelo seja gerado com uma das camadas em falta, o que impossibilita a leitura do ficheiro por parte do equipamento [14].

2.1.4.5. Parâmetros de Impressão

Para que o processo de impressão seja executado de forma eficiente, é fundamental um planeamento preciso do mesmo, a fim de que os parâmetros de impressão sejam corretamente configurados. Para tal, é necessário ter em conta quatro aspetos: (1) orientação e dimensionamento da peça, (2) divisão do modelo em camadas, (3) estruturas de suporte e (4) caminho de impressão [15].

Orientação da Peça

Usualmente, a peça é orientada segundo a configuração que minimiza o número de camadas total, o que resulta na redução de custos e tempo na produção da mesma. Além disso, é possível posicioná-la de forma a maximizar ou a melhorar uma região específica. Por exemplo, se a resistência da peça for um fator importante, deve orientar-se a zona da peça pretendida, para que fique mais resistente na direção contrária à da deposição do material [14]. A definição da orientação tanto pode ser feita no ficheiro STL ou no próprio modelo CAD [25].

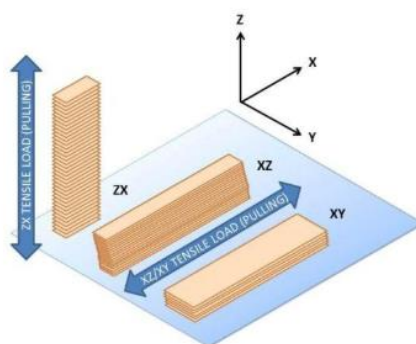


Figura 13 - Diferentes orientações da mesma peça [26]

A orientação da peça pode afetar o seu tempo de produção, a sua qualidade e as suas propriedades mecânicas e, em certos casos, é necessário conciliá-la com estruturas de suporte ou realizar acertos na deposição do material [26].

Divisão do Modelo em Camadas

Todos os processos de Fabricação por Camadas (*Layered Manufacturing*, LM), outro termo bastante utilizado na ótica da Impressão 3D, requerem que o modelo STL ou CAD seja dividido em camadas para executar a fabricação da peça. O método comumente designado por laminação de modelos 3D consiste na interseção de planos horizontais ao longo da geometria do mesmo e tem como função preparar o modelo para executar o passo seguinte: planear o caminho da deposição do material [25].

A divisão do modelo de forma uniforme é o processo mais frequente, o que significa que todas as camadas são aplicadas com a mesma espessura, independentemente da geometria do modelo. Estas são definidas de baixo para cima, sendo que cada camada é uma definição 2D da geometria do modelo, num plano XY. A espessura de cada camada fica ao critério do utilizador, mas geralmente varia em 0.2 e 0.4 mm. Os programas de divisão de modelos 3D definem as camadas em *G-code*, a linguagem para que a maioria dos sistemas AM estão programados para interpretar. Existe uma vasta gama de programas

de laminação no mercado, sendo que muitos deles são gratuitos como *PrusaSlicer*, o *Cura* e o *Slic3r*, e outros mais profissionais e pagos, como *SelfCAD*, o *Simplify3D* e o *Netfabb*.

Os problemas mais frequentes estão relacionados com o efeito de escada provocado pelas arestas escalonadas dos contornos 2.5D e com a contenção das camadas, a qual deve ser assegurada para que estas não caiam dentro ou fora do modelo original, destruído assim o modelo. Entenda-se o conceito 2.5D como sendo as projeções gráficas 2D utilizadas para simular a aparência 3D de um desenho ou imagem, quando na verdade estas não são realmente tridimensionais [26], [28], [27].

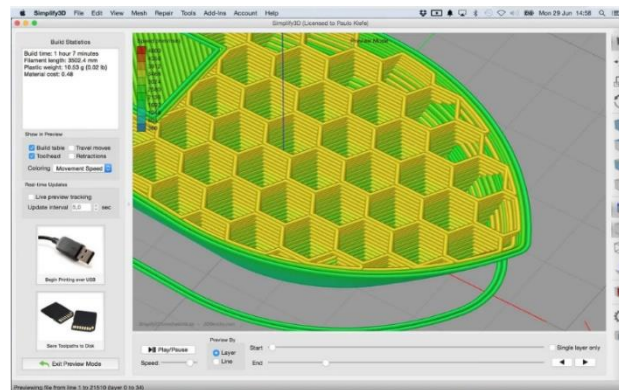


Figura 14 - Exemplo de um modelo fatiado no *Simplify3D* [15]

Estruturas de Suporte

Tudo o que existe na Terra está limitado pela gravidade e a Impressão 3D não é exceção. Quando existem partes da peça que não estão conectadas ao respetivo corpo principal ou são demasiado compridas e delgadas, é necessário adicionar estruturas de suporte durante o processo de impressão para que estas não colapsem. Nas atuais técnicas de FA, os próprios sistemas devem determinar automaticamente quais as regiões da peça que necessitam de suporte, daí a necessidade de um planeamento criterioso antes da execução do modelo CAD 3D. Os programas de laminação, por norma, calculam estas regiões com base na identificação das que possuem vetores normais com sentido descendente. Por outro lado, existem tecnologias que não necessitam de estruturas de suporte, devido à natureza do próprio processo. Como já foi mencionado, na técnica de SLS, as regiões em que o pó não é atingido com o laser não solidificam, mas servem como apoio à impressão da peça, dando-lhe a forma pretendida [14].



Figura 15 – Exemplos de estruturas de suporte [29]

No entanto, nem todos os projetos impressos em 3D requerem estruturas de suporte, por conseguinte é essencial, aprender a evitá-los. Deve assim evitar-se saliências, isto é, evitar imprimir a peça parcial ou completamente no ar, (como acontece com as letras T ou Y impressas verticalmente) e

evitar pontes (saliências conectadas ao modelo por duas extremidades) ou utilizar processos de impressão muito lentos [29].

Caminho de Impressão

O planeamento do caminho ou padrão de impressão deve ser dividido em duas fases: (1) planeamento do caminho interior e (2) planeamento do caminho exterior. No primeiro caso, a trajetória geométrica interior deve ser determinada, assim como os parâmetros do processo associados a essa trajetória. No segundo caso, deve ser definido com precisão o modo como o meio de depósito do material irá executar a geometria do caminho exterior.

Na maioria dos casos, existe uma sequência no modo como o material é depositado, de maneira a formar primeiramente o interior da peça, o que torna o planeamento do caminho interior obrigatório na maioria dos processos de LM. Por outro lado, a execução do caminho exterior envolve o uso de outra ferramenta para auxiliar a moldagem do exterior de uma camada para uma forma tridimensional. Habitualmente, para realizar esta função, utilizam-se ferramentas de remoção de material, como cortadores, espátulas planas, lasers, jatos de água, etc., dependendo do tipo de material e tecnologia aplicados [25].

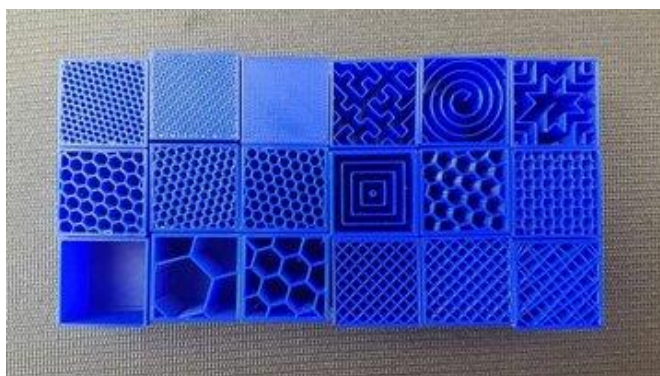


Figura 16 - Exemplos de caminhos de impressão diferentes [30]

O desafio de estabelecer o caminho mais adequado do interior da peça está sobretudo relacionado com os efeitos que caminhos alternativos podem ter no processo de impressão e na própria peça em si, como o tempo de produção e a resistência do produto. Estes efeitos variam de acordo com o tipo de processos utilizados, daí a necessidade de definir a trajetória de impressão mais adequada para o tipo de tecnologia que se irá utilizar. Já o incorreto delineamento do caminho exterior afeta diretamente a qualidade dos acabamentos das superfícies da peça, bem como a precisão da sua forma geométrica[15].

Impressão e Pós-processamento

Uma vez definido o planeamento e todos os parâmetros do processamento, pode dar-se início à etapa de produção da peça, que consiste em exportar os dados necessários e relevantes para o equipamento de impressão. Este procedimento pode apresentar alguns constrangimentos caso o formato dos dados não seja compatível com a máquina de impressão disponível, impossibilitando a sua leitura. Muitas vezes, o formato correto não está disponível gratuitamente ao utilizador, sendo portanto uma questão que se deve verificar atempadamente [20].



Figura 17 – Modelo impresso antes e depois do pós processamento [31]

Quando a impressão do modelo se encontra concluída, o processo em si pode ainda não ter terminado, visto que na maioria dos casos é necessário realizar trabalhos de acabamento para melhorar a textura da superfície da peça ou montagem e pintura das suas partes. Nas tecnologias de impressão por camadas, é frequente o aparecimento de defeitos no revestimento, como o chamado efeito de escada, como já explicado anteriormente, que é mais notável em superfícies curvas ou inclinadas. Assim, muitas técnicas de pós-processamento têm sido desenvolvidas e aplicadas, desde as mais baratas e amadoras às mais dispendiosas e profissionais: desde lixar a peça manualmente, à fundição da sua superfície, à aplicação de acetona até à utilização de equipamentos industriais mais tradicionais. No caso de terem sido utilizadas estruturas de suporte, estas devem ser removidas nesta fase de forma cuidadosa, para que a peça não seja danificada. É provável que ainda assim os suportes deixem marcas residuais na peça, que devem ser devidamente limpas através de um dos métodos mencionados [15],[32].

2.2. APLICAÇÕES DE IMPRESSÃO 3D NA CONSTRUÇÃO

A Impressão 3D tem surgido como uma tecnologia amplamente útil nas mais diversas áreas profissionais, o que torna necessário que, para cada uma delas, se deva sempre ponderar os materiais disponíveis, a velocidade de produção e a execução dos processos de fabricação a que se tem acesso[33]. A avaliação da viabilidade de uma aplicação em Impressão 3D faz-se considerando o seu volume de produção, o tamanho da peça e a complexidade e o custo do material. Inicialmente, a sua utilização centrava-se essencialmente em volumes pequenos de produção e na fabricação de peças com tamanho reduzido. Contudo, com o avanço da tecnologia, têm surgido equipamentos com maiores dimensões, bem como uma maior variedade de materiais de impressão, com a introdução de, por exemplo, alumínio, aço inoxidável, titânio, polímeros, cerâmicos e materiais cimentícios, como o betão, simples ou reforçado [34].

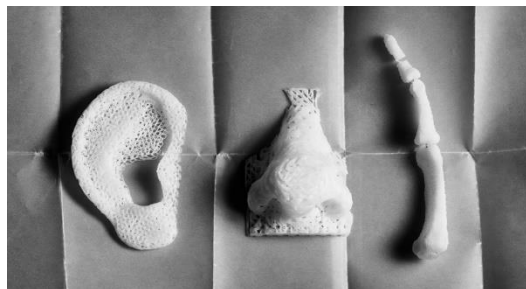


Figura 18 - Impressão 3D no âmbito da saúde [35]

O setor da Indústria da Construção (IC) também não ficou indiferente às potencialidades que a Impressão 3D demonstrou possuir e que poderiam de certa forma inovar e otimizar toda uma indústria conhecida pelo ser carácter tradicional e conservador. As capacidades de automação e de produção *in situ*, alinhadas com a redução de custos, de desperdícios e de poluição, bem como a aptidão de produzir peças com geometrias intrincadas, tornam a Impressão 3D numa ferramenta extremamente funcional e ótima para as técnicas de construção civil. No entanto, devido ao facto de ser uma tecnologia relativamente recente e, por isso, pouco desenvolvida, seriam expectáveis alguns entraves na sua introdução neste setor, que opera a uma escala volumosa e com meios e equipamentos rotineiros e que nunca sofreram uma revolução tecnológica considerável, nas últimas décadas. De qualquer forma, tal não impediu que várias empresas e entidades investissem o seu tempo e dinheiro no desenvolvimento de diferentes projetos, com diferentes escalas, recorrendo à tecnologia da Impressão 3D, e que mostraram ser bastante úteis para área da IC [36].

2.2.1. PROTÓTIPOS DE EDIFÍCIOS

A utilização de modelos tridimensionais, em escala reduzida, de edifícios que se pretendem construir ou reabilitar – as tradicionais maquetes, sejam elas arquitetónicas ou estruturais – sempre foi bastante comum em projetos de construção. Atualmente, os modelos de arquitetura ainda são construídos utilizando poliestireno, cartão, madeira, entre outros materiais, que são trabalhados através de máquinas de corte, tipo fio-quente ou *laser*, ou até mesmo corte manual, antes de serem todos montados para formar a geometria do edifício. Por isso, sempre se tratou de uma alternativa ambiciosa, pois a sua produção acarretava custos e tempo excessivos, com a possibilidade de não se concretizar e de não transmitir corretamente a ideia, uma vez que podem surgir erros de cálculo, falhas na fabricação e de precisão na geometria do edifício. Há uma maior probabilidade de que este tipo de percalços aconteçam com arquiteturas mais complicadas concebidas através de programas CAD 3D, que permitem produzir modelos de edifícios com um nível de detalhe bastante elevado [37].

De forma a resolver este problema, no início do século XXI, a IC começou a adotar a tecnologia de Impressão 3D para produzir maquetes arquitetónicas. A partir daí, foram testados vários processos para perceber qual aquele que apresentaria melhores resultados em relação à estabilidade da estrutura impressa. Foi demonstrado, por exemplo, que a tecnologia SLS reproduz modelos mais resistentes quando comparada com a FDM, em que as estruturas podiam colapsar. No entanto, diferentes processos podem igualmente funcionar, dependendo do nível de precisão com que se pretenda imprimir o modelo, algo que tem sido continuamente melhorado nos últimos anos. A principal vantagem desta implementação foi, sem dúvida, a velocidade de produção, dado que uma maquete podia ser impressa dentro de poucas horas [38].

De facto, o protótipo de um edifício pode ser útil de variadas maneiras, além do principal objetivo que é a visualização tridimensional do objeto. Este pode ser processado de forma modular, isto é, construído a partir de módulos mais pequenos que constituem partes do edifício, simulando cortes e plantas, para um melhor entendimento da composição da estrutura e sequência da construção. Por outro lado, maquetes que apresentem diferentes componentes com diferentes cores podem auxiliar a coordenação de projetos, fazendo corresponder certos elementos estruturais a diferentes fases da construção dos mesmos [39].

Também muitas faculdades de engenharia e cursos de modelação CAD 3D direcionados para projetos de construção recorrem já a modelos estruturais impressos como forma de ensino, porque estes permitem aos estudantes uma visualização palpável de todas as propriedades e disposições geométricas dos elementos construtivos o que, por vezes, constitui um desafio até para os mais experientes, devido

a possíveis incompatibilidades e sobreposições das diferentes especialidades do projeto que podem não ser tão perceptíveis nas projeções em 2D [40].

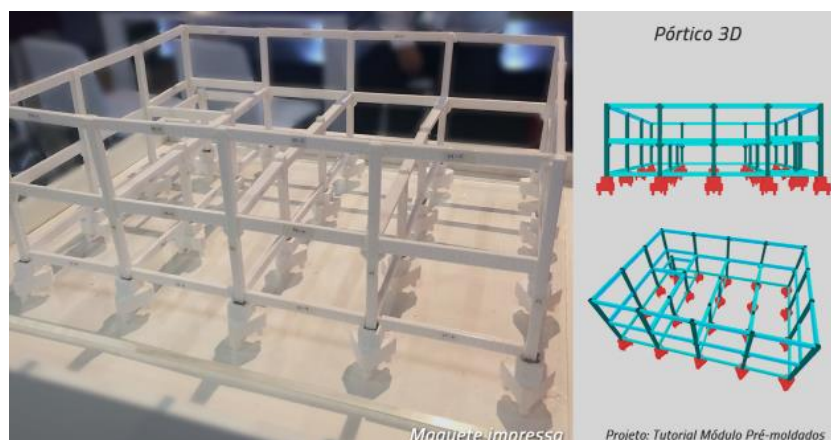


Figura 19 - Modelo estrutural impresso e o seu modelo digital CAD 3D [40]

Deste modo, pode concluir-se que a introdução de processos de Fabricação Aditiva para a construção de protótipos de edifícios, em alternativa às técnicas tradicionais de produção, trouxe vantagens para a IC. Esta prende-se com a redução de tempo, as capacidades técnicas para fabricar geometrias mais complexas com detalhes mais precisos, e as de execução de modos de processamento diferentes do mesmo modelo, de forma rápida e eficaz, ao longo da execução do projeto [39].

2.2.2.COMONENTES E LIGAÇÕES METÁLICAS

Neste momento, com a Impressão 3D, já é possível eliminar o problema mais comum inerente às ligações metálicas: a sua complexidade geométrica. Com a tecnologia de Fabricação Aditiva, a complexidade de uma peça não requer custos acrescidos, o que permite combinar diferentes funcionalidades num único modelo. Por exemplo, em peças em que seria necessário realizar a montagem das suas partes, aparafusando-as ou soldando-as, agora é exequível imprimi-las de uma só vez. Desta forma, não só é possível economizar em relação aos custos de produção, mas também relativamente aos custos de manutenção, pois os grupos de montagem única conseguem eliminar riscos como a não estanquidade dos elementos, geralmente provocada por erros de operação, durante a montagem. Outra vantagem é a possibilidade de adicionar ou melhorar a funcionalidade da peça, projetando-a. Estruturas, treliças e canais internos com formas complexas podem ser fabricados de modo a melhorar, por exemplo, o fluxo do ar ou a lubrificação. Outra alternativa é a criação de texturas e topografias externas, que possam melhorar as propriedades adesivas, para conectar outros elementos [41].

Nós De Fachada

O nó de fachada é um tipo de ligação metálica utilizado para ligar um conjunto de perfis de modo a formar uma fachada de uma estrutura metálica. De um modo geral, este tipo de ligação apresenta geometrias complexas e intrincadas para garantir uma série de requisitos de desempenho e de compatibilidade. Assim, foi desenvolvido um modelo para Impressão 3D, denominado “*Nematox*” para demonstrar como os processos de Fabricação Por Camadas podem ser bastante úteis na otimização das geometrias das fachadas. Além disso, esta solução move as ligações estruturais para fora do nó,

assegurando que nenhum defeito de fabrico possa afetar a estabilidade e estanquidade dos vários elementos da peça.

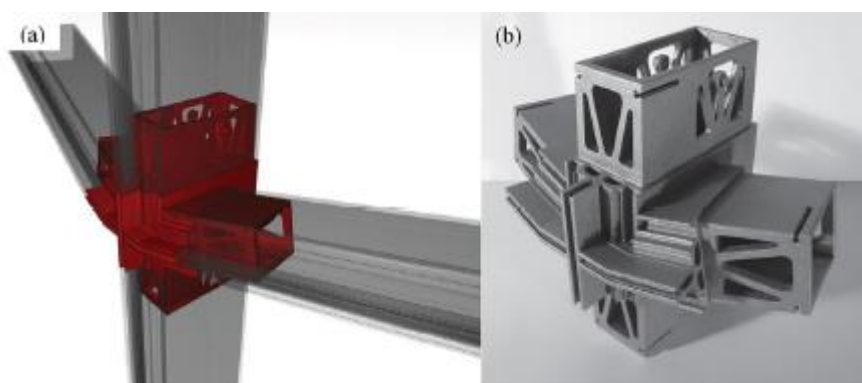


Figura 20 - Modelo CAD 3D e protótipo à escala real do nó *Nematox* [42]

Um protótipo à escala real foi impresso, recorrendo a uma tecnologia semelhante à do processo de SLS, em que foi utilizado pó de alumínio para a sua materialização. O modelo do nó exigiu 120 horas de projeto CAD, 10 horas para converter o ficheiro CAD para um formato específico de Fabricação Aditiva, 2 horas para enviar o ficheiro para o programa informático do equipamento de impressão e 4 horas de trabalhos de pós-processamento. Apesar do tempo despendido na modelação CAD e nos trabalhos de acabamento, o nó de fachada *Nematox* é um caso de sucesso e um exemplo de como uma ligação metálica de alta tecnologia pode ser aplicada em qualquer sistema de fachada existente, dado que este foi testado e a sua funcionalidade verificada [42].

Nós de Estruturas Sob Tensão

A *ARUP* é uma empresa de consultoria multinacional, bastante conhecida nas áreas de engenharia e arquitetura pelas suas abordagens requintadas e inovadoras. A esta empresa foi entregue o projeto de uma das ruas comerciais da cidade de Haia, nos Países Baixos, que consistia em erguer 3 estruturas metálicas, de grande dimensão, com cabos sob tensão que funcionariam como suporte para iluminação pública, tendo sido apelidadas de “lustres urbanos”. Dado que as estruturas necessitariam de mais de 1600 nós metálicos, com diferentes e complexas geometrias, a empresa foi motivada a aprender e a introduzir técnicas de Fabricação Aditiva para a composição em massa dos seus produtos [43].

A técnica tradicional para produzir estes nós metálicos consistia em soldar até 7 chapas metálicas, geralmente com formas distintas e intrincadas, a um tubo de aço central. Contudo, a *ARUP* conseguiu otimizar a topologia dos nós através de programas CAD e racionalizar o modelo para fabricação, reduzindo a quantidade de material utilizado para a sua produção, de forma a minimizar o tempo e custos de produção. Com a movimentação das peças, aquando da sua impressão, a empresa conseguiu também evitar a utilização de estruturas de suporte e, assim, evitar o dano das peças na sua remoção.

O primeiro protótipo destes nós metálicos inovadores foi realizado a uma escala de 40% do tamanho real, utilizando igualmente um processo de Impressão 3D à base de pó, neste caso de aço de alta resistência. Contudo, foi verificado que o novo nó de fabricação aditiva custou cerca de 3 vezes mais do que o nó fabricado tradicionalmente, embora seja expectável que se torne mais barato com o desenvolvimento da tecnologia.

Com o conhecimento adquirido na produção do primeiro protótipo, um segundo foi idealizado. O objetivo principal seria reduzir o peso total do primeiro modelo, removendo material onde o nó estaria submetido a menores tensões. Outra alteração foi a utilização de pó de aço inoxidável que tornou o nó 75% mais leve e com metade da altura, reduzindo assim o peso total da estrutura de iluminação em cerca de 40%, mantendo sempre as suas conexões completamente integradas. Isto exigiu competências computacionais de alto nível e mais tempo investido na fase de pós-otimização [42].

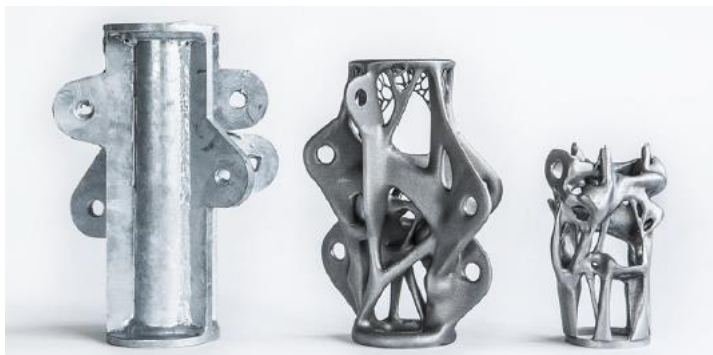


Figura 21 – Evolução desde o nó metálico tradicional até aos dois protótipos impressos em 3D da ARUP [42]

Assim, comparando os 3 elementos estruturais (o nó tradicional, o primeiro e o segundo protótipo), representados na imagem acima, conclui-se que todos eles conseguem suportar as mesmas cargas e esforços da estrutura. Todavia, o segundo protótipo tem um tamanho bastante mais reduzido e uma geometria muito mais otimizada, provando que a Impressão 3D pode efetivamente otimizar tanto a fabricação de elementos estruturais metálicos como os seus formatos geométricos [43].

2.2.3. ELEMENTOS CONSTRUTIVOS

Protótipos De Tijolos

A construção de estruturas rígidas com recurso a tijolos é das técnicas mais antigas e comuns de sempre, pois estes são elementos resistentes e duradouros e o seu aquecimento ainda os fortalece mais. Apesar de a sua matéria-prima variar de região para região, as técnicas de fabricação não sofreram muitas alterações ao longo do tempo. Contudo, com a introdução da Fabricação Aditiva, a produção de tijolos apresentou uma forte evolução, como é possível constatar nos casos que a seguir se apresentam [44].

Em primeiro lugar, a *Emerging Objects* (empresa direcionada para projetos em Impressão 3D) criou um novo tipo de tijolo, utilizando para o efeito e maioritariamente argila e areia, capaz de arrefecer compartimentos e estabilizar edifícios em caso de ocorrência de sismos. Posteriormente, em 2010, a empresa descobriu que quando adicionada à argila maltodextrina, um material orgânico, resultava um material cerâmico com poros minúsculos, dando a aparência de uma “esponja cerâmica”. A partir deste material, foi criado o “*Cool Brick*”, um tijolo cerâmico impresso em 3D com cerca de 15 cm de comprimento e com a forma de um hexágono alongado. Este assemelha-se a uma pequena treliça com orifícios maiores, pelos quais o ar e a luz indireta podem passar. Quando em contacto com água, esta é absorvida pela cerâmica e, mais tarde, evapora, arrefecendo o ar envolvente, como representado na Figura 23. Os blocos podem ser dispostos em diferentes padrões, adequando-se o melhor possível ao ambiente. Devido a todas as vantagens e novas funções que o *Cool Brick* apresentou em relação aos

tijolos tradicionais, este é apresentado como uma aplicação de sucesso que mudou o conceito de edifícios de alta tecnologia.



Figura 22 - Tijolo *Cool Brick* da *Emerging Objects* [45]

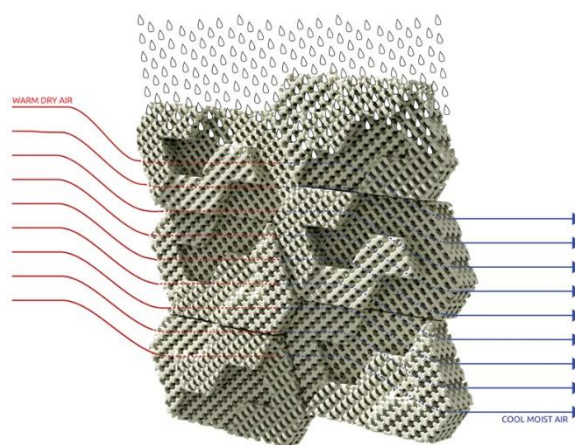


Figura 23 - Esquema de funcionamento do processo de evaporação dos *Cool Brick* [45]

A *Emerging Objects* foca-se principalmente na impressão modular de objetos, como se poderá constatar mais à frente, ao contrário de outras empresas que preferem fabricar estruturas de grande dimensão de uma só vez. Contudo, esta empresa acredita que produzir peças de tamanho mais modesto para posterior montagem é mais prático, desde que se recorra a muitas impressoras de pequeno formato, pois em caso de avaria de uma delas, as restantes poderão continuar a produção. Outra vantagem será a facilidade em transportar e substituir as suas componentes [45].

Um segundo caso foi uma colaboração entre o grupo empresarial *Sino* - cujo principal negócio é o investimento no desenvolvimento de edifícios para a sua comercialização - com os estudantes de arquitetura da Universidade de Hong Kong. Esta colaboração resultou na criação de uma torre única, construída com 2000 tijolos de terracota (argila cozida em forno) impressos em 3D. Esta torre, com o nome de “*Ceramic Constellation Pavilion*”, tem 3.8 metros de altura e foi construída de uma só vez com tecnologia robotizada, contrariamente às estruturas fabricadas com os *Cool Brick*. Foram depositados mais de 700 kg de argila terracota bruta por um braço robótico equipado com uma cabeça de Impressão 3D. Em vez de os tijolos serem mantidos em conjunto com a argamassa convencional, estes são suportados por uma estrutura de madeira. Cada tijolo demorou cerca de 2 a 3 minutos a ser produzido e, no final, todos foram expostos a uma temperatura de 1025°C de forma a enrijecerem. O *design* exclusivo de cada tijolo foi realizado digitalmente e foi concebido para providenciar a resistência e a estabilidade necessárias à segurança da torre. A maneira como os tijolos foram montados permite o fluxo do ar e a transparência visual. Não tendo sido estudado como seria o comportamento da torre face às condições exteriores, este projeto foi concebido com o principal objetivo de exploração de processos e dos seus resultados e não tanto o de apresentar um produto final. Desta forma, foi demonstrada como a construção robotizada de edifícios de grandes dimensões poderão ter um efeito profundo no mercado, havendo ainda, no entanto, muito espaço para evoluir em termos de investimento financeiro e de eficiência [44].

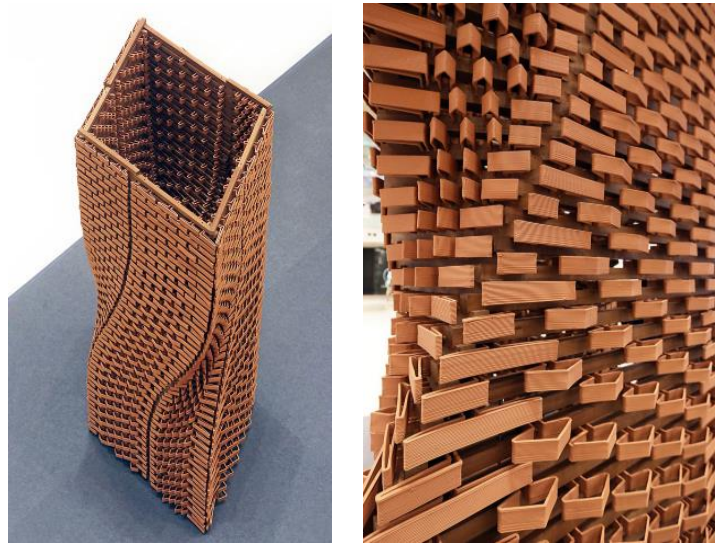


Figura 24 - Torre construída com os tijolos de terracota com *design* exclusivo da Sino [44]

Protótipos De Paredes

Cada vez mais as tecnologias de Impressão 3D são consideradas uma estratégia de construção viável, graças ao seu avanço nos processos de modelação aperfeiçoados pelos programas educacionais. Assim, têm sido estudados novos conceitos de paredes, estimulados principalmente por questões de sustentabilidade social e ambiental.

Por exemplo, as entidades *IAAC* (*Institute for advanced architecture of Catalonia*) e *WASP* (empresa líder no mercado de projetos em Impressão 3D) colaboraram para criar um protótipo inovador de uma parede totalmente impressa com tecnologia AM. Esta consistia numa solução arquitetónica para moradias sustentáveis a preços acessíveis e parcialmente construídas pelos moradores. O protótipo de uma parede à escala real tinha 40 cm de espessura, com elementos de madeira interligados que serviam de suporte às escadas e estruturas do piso projetadas precisamente para ficarem fixadas à parede, uma solução que representa um grande passo na realização de estruturas à base de terra, para suporte de cargas. O material empregue na construção do protótipo foi uma mistura de argilas e fibras de arroz.

A impressão da parede demorou cerca de 40 horas até ficar concluída e gastou no total 2 m³ de material. A modelação foi processada internamente, de forma a conferir a solidez necessária e a expressividade estética pretendida. Foi utilizado o equipamento “*Crane WASP*” como sistema colaborativo de impressão 3D, já frequentemente utilizado pela própria empresa, para construir casas à base de terra, argamassas de betão e geopolímeros. Este equipamento robotizado é capaz de transferir a lógica do formato para modelos de construções reais, permitindo desta forma a experimentação de sistemas arquitetónicos e estruturais inovadores e a promoção do desenvolvimento da Impressão 3D na IC [46].



Figura 25 - Parede à base de terra impressa com escadas de madeira embutidas e respetivo padrão de impressão [46]

Um outro caso foi a criação da parede “*Banyan Eco*” por parte do departamento de inovação da empresa *BigRep*, já mencionada neste capítulo. Apesar de a empresa já ter imprimido diferentes protótipos de paredes, a parede *Banyan Eco* destacou-se pelos seus princípios ambientais e o seu complexo, elegante e inteligente formato. Esta é a primeira parede “verde” do mundo impressa em 3D que possui o seu próprio sistema de abastecimento de água, irrigação e drenagem. As técnicas tradicionais de produção, como moagem ou moldagem por injeção, não seriam capazes de criar uma estrutura tão complexa e funcional. A ideia base do projeto foi inspirada nos elementos dos sistemas orgânicos das plantas, como as folhas, as raízes e as hastes, resultando daí uma geometria biônica, como se pode ver na Figura 26. Tendo como dimensões 2.0 x 2.0 x 0.6 m, a parede não só serve de suporte para plantas, como também atua como o seu próprio sistema de abastecimento de água. A *Banyan Eco Wall* é composta por 4 segmentos impressos em 3D e revoluciona a tecnologia de jardins verticais, devido aos seus tamanho, funcionalidade e aparência. A parede foi impressa utilizando filamentos de plástico PETG e os vasos das plantas com filamentos de *Black PRO HT*, um material à base de compostos biológicos, ambos fabricados pela *BigRep*.

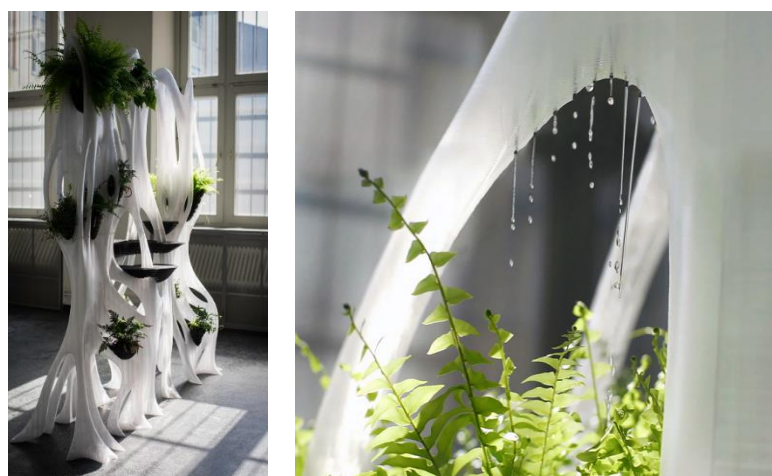


Figura 26 - *Banyan Eco Wall* do departamento de pesquisa e inovação NOWLAB [47]

O seu sistema de abastecimento de água é formado por pequenos tubos internos, muito finos, que oferecem o fluxo de água ideal, utilizando um mecanismo integrado que mantém as plantas irrigadas exatamente onde é preciso. Já os sistemas de drenagem têm como objetivo remover o excesso de água nos vasos, garantindo assim o funcionamento pleno do sistema. Os mecanismos de drenagem de água em estruturas verdes verticais são geralmente feitos de metal, integrados na parede posteriormente ou baseados em sistemas complexos e confusos constituídos por várias partes. Neste caso, o sistema de drenagem foi criado durante o processo de Impressão 3D, algo inédito e emocionante na IC. Assim, o formato orgânico da parede *Banyan Eco* não é apenas agradável esteticamente, mas é também estruturalmente otimizado e bifuncional [47].

Estruturas de Isolamento Térmico

À medida que a tecnologia foi evoluindo, novas técnicas de isolamento térmico foram surgindo, respondendo à necessidade de atingir metas atuais e exigentes, relativamente à eficiência energética dos edifícios. Por exemplo, um dos objetivos da União Europeia (UE) para 2020 é a construção de edifícios exclusivamente com necessidades quase nulas de energia. Isto só será possível a partir da criação de novos processos de engenharia e de arquitetura, assim como da introdução de isolantes térmicos inovadores [48].

Neste sentido, em 2017, investigadores do Instituto Wyss da Universidade de Harvard, em conjunto com a Escola de Engenharia e Ciências Aplicadas (SEAS) e o Instituto de Tecnologia de Massachussets (MIT), inspiraram-se em estruturas celulares naturais para desenvolver um novo processo de Impressão 3D de materiais com macroajustável e com porosidade em microescala, utilizando tinta de espuma cerâmica. A impressão da tinta realiza-se diretamente, de forma a criar uma estrutura com a forma de favos de mel hexagonais e porosos. Quando esta se solidifica, a peça resultante é constituída por ar e cerâmica, em várias escalas de comprimento, sendo que a porosidade nas propriedades micro e macro determina as propriedades da estrutura. Desta forma é possível criar estruturas mais leves a partir de tecnologias de Impressão 3D, possibilitando a aplicação desta nova abordagem em estruturas de isolamento térmico. E embora a equipa de investigadores se tenha focado num único material cerâmico neste estudo, as tintas de espumas para impressão podem ser à base de outros materiais, como metais e polímeros [49].

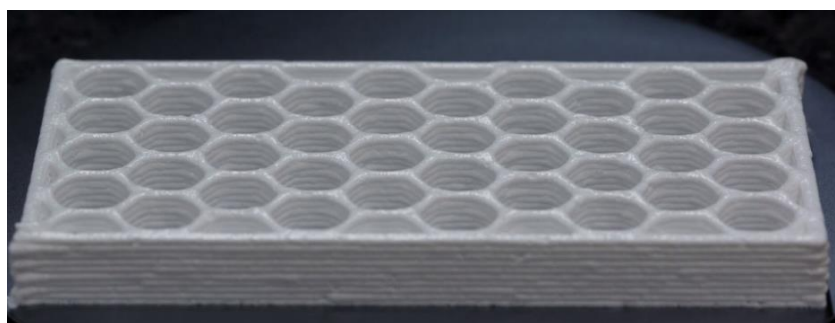


Figura 27 - Estrutura celular impressa com espuma cerâmica [49]

Já em 2019, na Universidade de Aveiro, uma equipa de investigação conseguiu fabricar espumas para isolamento térmico, através de uma técnica semelhante, em Impressão 3D. O material selecionado para a constituição da espuma foi a cortiça residual da produção de rolhas de garrafas de vidro, dado

que a cortiça é um ótimo isolante térmico, promovendo assim a economia circular. Com o seu emprego na produção de tinta de espumas de poliuretano para Impressão 3D, é possível obter valores de condutibilidade térmica idênticos às espumas de isolamento térmico convencionalmente utilizadas na IC. Dado que a sua geometria é do género da descrita anteriormente, pois trata-se de blocos de espuma com estrutura celular, os elementos têm o peso ideal para funcionarem como isolantes térmicos estruturalmente eficientes. A vantagem da cortiça centra-se no aumento da sustentabilidade e da flexibilidade das espumas, que pode também ser de interesse para outras áreas, como em materiais com capacidade de absorção acústica e de vibrações. Contudo, devido ao custo atualmente associado à produção de espumas produzidas através técnicas aditivas, para já é inviável fabricar painéis para isolamento térmico de edifícios. No entanto, no futuro, com o desenvolvimento da Impressão 3D, o seu fabrico poderá tornar-se exequível [50].

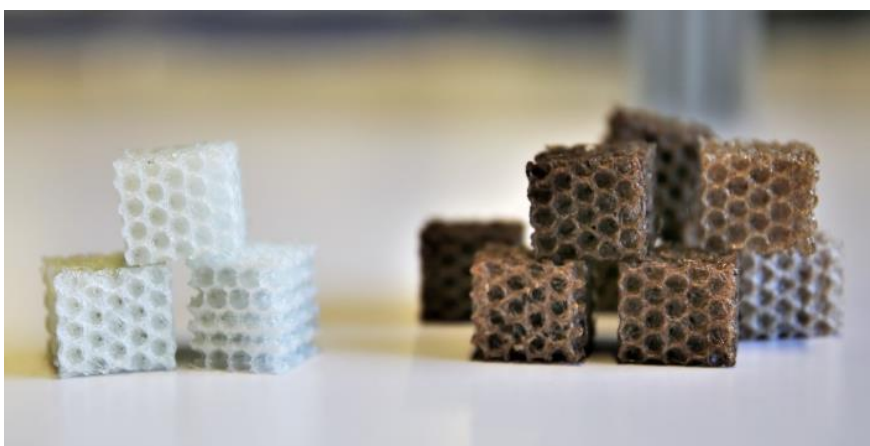


Figura 28 – Blocos de espumas de Isolamento Térmico à base de cortiça impressas em 3D [50]

2.2.4. REABILITAÇÃO DE EDIFÍCIOS

Muitas estruturas antigas conseguiram resistir e prosperar durante muitos e longos anos. Algumas são consideradas históricas, culturalmente importantes e geralmente adquirem um estatuto especial. Daí a importância de conservar e reabilitar estes edifícios que são invariavelmente sujeitos a uma série de fatores que contribuíram para a sua deterioração, tais como a poluição, a bio deterioração e cargas mecânicas. Contudo, trabalhos de restauração nem sempre são simples, podendo existir alguns constrangimentos que podem influenciar o resultado pretendido: replicar perfeitamente a estrutura antiga. Estes entraves estão relacionados com a falta de documentos ou desenhos, intervenções incompatíveis com a estrutura ou medições e mapeamentos ineficazes. Outra dificuldade é devida ao facto de os materiais utilizados antigamente se basearem em pedra e alvenaria, frequentemente com gravuras detalhadas e que podem estar em superfícies curvas e complexas. Reproduzir ou reconstruir estas peças, muitas vezes constitui uma tarefa difícil, pois existe sempre o risco de danificar ainda mais a estrutura. Por outro lado, com o avanço das tecnologias digitais, estes problemas podem ser superados. Os atuais sistemas de digitalização tridimensional (*3D scanning*) e de medição fotogramétrica de formas têm já capacidade de medir a dimensão espacial das estruturas e de artefactos existentes. Combinado com a tecnologia de Impressão 3D, são inúmeras as aplicações possíveis para auxiliar os trabalhos de restauro ou reconstrução [51].

A empresa americana de arquitetura e engenharia *EDG* (*Experion Design Group*), além de projetar novos edifícios, realiza também projetos de reformas e de reabilitação. Nos últimos anos, a empresa tem investigado como os recursos da Impressão 3D podem beneficiar a sua indústria, sendo esta já especializada em planos e códigos de construção, restauração, ciência dos materiais, engenharia estrutural e projeto arquitetônico. Ao estudar tecnologias aditivas, o seu principal objetivo era deixar de as usar apenas para criar pequenas peças delicadas e quebráveis para produzi-las com o intuito de aplicá-las numa construção real. Daí surgiu a possibilidade de utilizar a Impressão 3D para fabricar moldes complexos para criar peças ornamentais de betão, no local da reabilitação. Quando a equipa *EDG* aprendeu a aplicá-las corretamente, aproveitou um edifício da década de 40, em Nova Yorque, que estava para ser demolido, para realizar os devidos testes às suas novas técnicas de Fabricação Aditiva para trabalhos de restauro. A empresa apelidou este projeto de “*The Architects Newspaper*”. Todas as peças criadas para este estudo foram impressas no local, onde também lhes foi acrescentada uma malha de arame e estribos, para assegurar a estabilidade da cofragem. Além disso, a empresa projetou ainda um sistema de ligação com placas para as peças de betão, de forma a simplificar a sua fixação à fachada do edifício.



Figura 29 - Processo de moldagem e diferentes peças de betão moldadas [52]

Com esta nova técnica, que combina a produção de molduras de betão com a Impressão 3D, é possível criar várias texturas, acabamentos, formas fluídas e padrões únicos, apenas possíveis com a aquisição de peças pré-fabricadas. Embora a sua pesquisa tenha um impacto positivo, sobretudo nos métodos de preservação de edifícios históricos, esta apresenta-se também como uma ferramenta útil para a construção de fachadas com formas mais alternativas [52].

A ideia de utilizar tecnologias de Fabricação Aditiva em projetos de reabilitação de edifícios antigos também surgiu à empresa de construção australiana *Geiger Group* quando lhe foi entregue uma obra de restauro. Tratava-se da conversão de uma cervejaria histórica para um centro de eventos e escritórios e apresentava como maior desafio a substituição de segmentos de cinco enormes caixilharias de pedra, que se encontravam destruídas e deterioradas, mantendo a sua estética original. A técnica convencional para o fabrico destas esquadrias incluiria alvenaria de pedra, o que consistia numa atividade altamente qualificada e que gera resultados impressionantes, mas que acarreta custos e tempo de produção elevados. A opção seguinte seria usar cofragens de espuma revestidas com resina para moldar o betão, o que envolve muito desperdício e resíduos tóxicos. Além disso, poderia não provocar o resultado esperado, dado a profundidade do padrão da superfície das caixilharias. Assim, a *Geiger* contactou o departamento de inovação *NOWLab*, pertencente à empresa de equipamentos de Impressão

3D *BigRep*, para explorar uma terceira opção, a impressão em 3D das cofragens, de forma a moldar os segmentos curvos em betão das caixilharias.



Figura 30 - Segmento de uma das caixilharias de betão, depois de ser retirado da cofragem impressa em 3D [53]

Neste sentido, a *Geiger* forneceu os seus ficheiros CAD que continham todas as especificações das caixilharias à *NOWLab* e que, por sua vez, os utilizou para produzir o padrão digital da cofragem. Seguidamente, utilizaram o programa informático *Simplify3D* para dividir o modelo em camadas e gerar o respetivo ficheiro *G-code*. Com a impressora *BigRep ONE* imprimiram a cofragem usando o filamento de PLA biodegradável da mesma empresa. Esta impressora tem a capacidade de imprimir modelos até 1 m³ de volume, sendo assim ideal para este projeto. Neste caso, o cliente forneceu os modelos CAD, mas num cenário diferente a *NOWLab* poderia produzi-los a partir da digitalização 3D de uma peça modelo. Depois de impressos, os vários segmentos foram montados no local da sua implementação, formando as caixilharias por completo.

Ambas as empresas acreditam que a impressão das caixilharias, em alternativa aos métodos convencionais, reduziu os custos do processo em 50% e o tempo de produção em 45%, tendo ainda sido utilizada menos mão-de-obra para concluir o projeto. Por outro lado, este método permite também um maior controlo da geometria das peças por parte dos arquitetos, tanto no seu computador como na sua fabricação no local, e torna a implementação de cofragens muito mais sustentável [53].

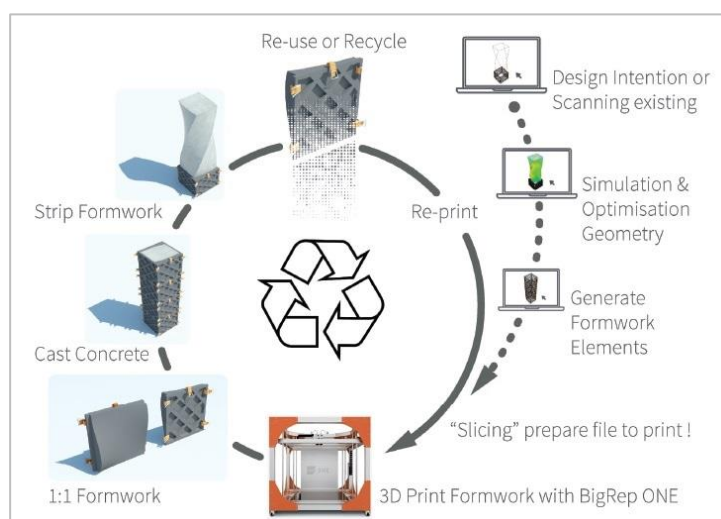


Figura 31 - Esquema do processamento da impressão das cofragens da *NOWLab* [53]

2.2.5. ESTRUTURAS PRÉ-FABRICADAS

Os edifícios modulares ou pré-fabricados correspondem a estruturas em que os respectivos elementos são fabricados fora do local da sua implantação, em painéis, módulos ou secções, para posteriormente serem enviados para esse local e aí montados. Estes edifícios têm ganho particular interesse nos últimos anos, devido ao seu processo sustentável e eficiente, algo também característico das estruturas impressas em 3D. Além disso, ambas as técnicas de construção são significativamente mais rápidas do que os procedimentos tradicionais. Por outro lado, as tecnologias de Impressão 3D podem servir igualmente como ferramentas para a fabricação de edifícios modulares. A Fabricação Aditiva de edifícios fora do local permite uma maior adaptação, em comparação com a produzida *in situ*, visto que, no primeiro caso, a fabricação é realizada em fábrica, onde existem os meios e o espaço necessários para a elaboração pacífica dos respectivos módulos. Estes podem ser enviados para o local de implantação do edifício gradualmente, sendo posteriormente montados [54].



Figura 32 - Módulo pré-fabricado e impresso da Haus pronto para entrega [54]



Figura 33 – 2 Módulos pré-fabricados e impressos da Haus no local da entrega [54]

Com o aumento dos preços das novas habitações e o crescimento da preocupação em construir edifícios ecologicamente sustentáveis, a *start-up* americana Haus aproveitou as potencialidades da pré-fabricação e da Impressão 3D para reinventar o conceito de casas inteligentes autossustentáveis. Esta criou uma casa moderna que recorre a técnicas aditivas para imprimir estruturas sólidas, produzidas e entregues em apenas algumas semanas. Tendo como suporte estruturas metálicas, os módulos são impressos de uma só vez com um material esponjoso, à base de compostos de polímeros, que endurece, providenciando a estabilidade estrutural necessária à casa. Além disso, ao contrário do que acontece em construções fabricadas tradicionalmente, o formato das moradias Haus conferem uma eficiência energética superior aos requisitos estabelecidos pelos EUA para 2030. Assim, combinando a Impressão 3D com o sistema de casas inteligentes *AI Smart HomeOS* e os princípios de construção modernos, a *start-up* oferece modelos em que não são produzidas quaisquer emissões de carbono, oferecendo também a alternativa de estes não necessitarem de estar ligados às redes de eletricidade, de abastecimento de água ou de drenagem de esgotos. A empresa garante ainda que as suas moradias têm uma vida útil superior às tradicionais e que mantêm o seu espaço interior livre de 99% de vírus e bactérias e funcionam perfeitamente em qualquer clima [55].

2.2.6. ESTRUTURAS DE BETÃO *IN SITU*

Desde o início dos anos 2000 que a automação tem predominantemente evoluído e permanecido em todos os setores industriais, à exceção da IC. Esta sempre apresentou algumas dificuldades na implementação de processos automatizados, devido sobretudo à inadequação das tecnologias de fabricação automatizada disponíveis para produtos de grandes dimensões e para as opções de formatos convencionalmente aplicadas. À exceção deste caso, as técnicas de Fabricação Aditiva sempre foram bastante limitadoras em relação aos materiais que poderiam ser empregues e economicamente não se apresentavam muito apelativas para o setor da construção. Contudo, o desejo de automatizar a IC sempre prevaleceu, dado que esta indústria é fortemente conhecida pela sua baixa eficiência, a sua alta taxa de acidentes de trabalho durante a produção e a impossibilidade de garantir a qualidade dos processos de trabalho. Além disso, nos dias de hoje, a quantidade de mão-de-obra especializada é cada vez mais diminuta e a fiscalização das obras cada vez mais necessária e obrigatória [56].

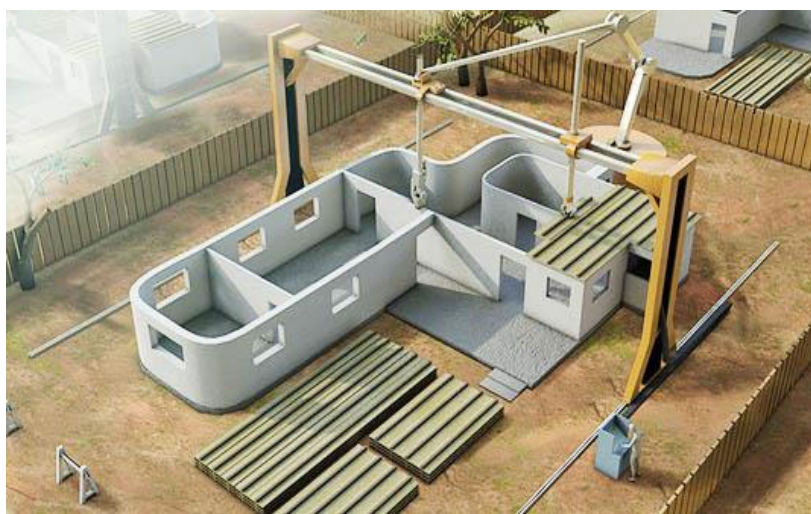


Figura 34 - Ilustração do método de impressão *Contour Crafting* [57]

Como alternativa, a Impressão 3D de betão apresentou-se como um método de construção inovador que tem a capacidade de produzir a estrutura de um edifício a partir da sobreposição de camadas de betão depositadas através de um bico de impressão, sem necessitar de cofragens ou de processos de compactação, como a vibrocompactação. A elaboração do contorno da geometria do edifício (*Contour Crafting*, CC) é um método aditivo de construção de estruturas de betão que utiliza tecnologia robotizada e que potencia a otimização e a automação das técnicas construtivas correntes. Este elimina algumas fases que normalmente consomem muito tempo em obra, reduzindo assim a duração do processo de construção, o que por sua vez reduz também os custos, o desperdício da superprodução e a mão-de-obra. Por outro lado, confere uma maior liberdade de construção de formas estruturais complexas que não são geralmente possíveis de executar com os métodos tradicionais [58].

A aplicação do *Contour Crafting* na IC é realizada a partir de um sistema robotizado em formato de pórtico que carrega e mobiliza o bico de impressão através de duas faixas paralelas instaladas no local da construção. A obra de um edifício, ou de um conjunto de edifícios, pode ser completamente executada com recurso a um único e contínuo processo de impressão. No caso de estruturas convencionais, estas também podem ser construídas com o auxílio da Impressão 3D, utilizando, por exemplo, vigas de suporte e braços robotizados, sendo possível criar estruturas em adobe (material à

base de terra) sem o uso externo de estruturas de suporte para proporcionar a forma. Um exemplo excelente desta utilização são as habitações sustentáveis projetadas pela *CalEarth (California Institute of Earth Architecture)* que apresentam estruturas em adobe em forma de cúpulas e abóbodas, totalmente impressas em 3D.

As vantagens associadas ao CC (*contour crafting*) são numerosas e idênticas aos benefícios inerentes à Impressão 3D noutros setores industriais. Em primeiro lugar, o processo permite aos arquitetos projetar estruturas funcionais e ao mesmo tempo com geometrias originais, proporcionando uma maior flexibilidade em todo o desenvolvimento da arquitetura de um edifício. Por outro lado, vários materiais podem ser utilizados além do betão, tanto para realizar superfícies exteriores como estruturas resistentes. Materiais que reagem quimicamente entre si podem ser alterados através do sistema de bicos do CC e misturados antes da sua deposição no local de trabalho. A sua quantidade é controlada computacionalmente e alocada em diversas regiões da estrutura em desenvolvimento, o que torna possível a utilização de várias quantidades de compostos diferentes, em diferentes zonas. A qualidade do acabamento das superfícies em CC é controlada pela superfície da espátula e é independente do tamanho do orifício do bico, o que produz um resultado excelente, eliminando a necessidade de preparação da estrutura para a respetiva pintura. Podem ainda ser implementadas *courettes* no interior das paredes de betão, à semelhança do que acontece em estruturas de betão tradicionais, precisamente como foram modeladas em programas CAD.

Para além da automação da construção do betão, outras técnicas construtivas podem ser automatizadas quando alinhadas com a tecnologia de Impressão 3D. Por exemplo, o encaixe modular robotizado das armaduras tradicionais de reforço do betão; a colocação de revestimentos de pisos e paredes de forma controlada, com recurso a um braço robótico que pode ser instalado na mesma estrutura que move o bico de CC; a construção automatizada de tubagens de abastecimento de água; a drenagem de esgotos e redes elétricas, se instaladas as referidas *courettes* através da Impressão 3D; e a pintura automática das superfícies de acordo com os requisitos pré-estabelecidos, através de um manipulador robótico de pintura por *spray* incluído na estrutura principal do CC, entre muitas outras possibilidades[56]. Desta forma, em todo o globo, já são muitas as empresas e entidades que apostam no desenvolvimento da Impressão 3D para a construção de edifícios de betão, tendo sido já realizadas obras impressionantes com esta tecnologia



Figura 35 - Casas de isolamento social de emergência impressas em 24 horas da Winsun [60]

Já no presente ano, em 2020, face ao combate da tão impactante epidemia do novo corona vírus, que surgiu na China na cidade de Wuhan, a empresa chinesa *Winsun* imprimiu em 3D casas de isolamento, de forma a conter a acelerada propagação do vírus e a aliviar a crise humanitária instalada em todo o país e, mais tarde, por todo o mundo. O principal objetivo da fabricação rápida destas casas foi acomodar pessoas e equipas médicas em estado de quarentena, aliviando assim os hospitais que se encontravam sobrecarregados. Este é um ótimo exemplo de como o uso da Impressão 3D na construção pode ser uma solução alternativa no caso de uma situação de emergência. Assim, na cidade de Xianning, a empresa conseguiu imprimir as paredes de betão de 15 casas em apenas 24 horas, com tempo médio inferior a 2 horas para a construção de cada uma. Todas têm uma superfície de 10 m², uma altura de 2,8 m, equipadas com 1 casa de banho, ar condicionado e, atendendo aos padrões de isolamento exigidos, podem acomodar no máximo 2 pessoas. Foram utilizados materiais recicláveis, como areia e entulho de construção para fabricar o betão. A empresa garante que esta nova mistura ecológica confere mais resistência e durabilidade às estruturas do que o betão tradicional, no entanto, por nunca terem sido testadas, ainda não se sabe ao certo a solidez destas habitações de isolamento construídas para casos de emergência [59], [60].

3 DEFINIÇÃO DOS CASOS DE ESTUDO

3.1. RECURSOS TECNOLÓGICOS DISPONÍVEIS

O procedimento experimental implementado na presente dissertação consiste na impressão de diversos modelos tridimensionais, com o objetivo de serem aplicados no âmbito da construção civil. Para auxiliar a definição desta aplicação, foram estudadas as componentes e as principais características da impressora disponível, bem como os materiais e programas de processamento compatíveis com a mesma.

3.1.1. IMPRESSORA E AS SUAS PROPRIEDADES

A impressora disponibilizada para a produção do modelo experimental foi a *Original Prusa i3 MK3S* da *Prusa Research*, uma empresa de fabrico de impressoras 3D fundada por Joseph Prusa em 2012. Esta começou modestamente, como uma empresa iniciante de um só homem sitiado na sua garagem, mas, com o passar do tempo, o formato do modelo da impressora *Prusa i3* tornou-se num dos mais reconhecidos projetos de impressoras 3D de tecnologia FDM em todo o mundo, tendo sido amplamente utilizada tanto por profissionais como por entusiastas. Tal aconteceu devido sobretudo ao facto de todas as suas componentes serem de código aberto, isto é, disponibilizadas gratuitamente e com a permissão para serem redistribuídas e modificadas livremente. Localizada em Praga, atualmente a *Prusa Research* emprega mais de 300 trabalhadores e produz cerca de 6000 impressoras 3D por mês que são posteriormente enviadas para qualquer parte do mundo [61].



Figura 36 - Impressora 3D: *Original Prusa i3 MK3S* [62]

Como já mencionado, o modelo *Prusa i3 MK3S* utiliza a tecnologia FDM ou Fabricação por Fusão de Filamentos (*Fused Filament Fabrication*, FFF). Ambos os termos podem ser considerados sinónimos, dado que o nome FDM provém da marca comercial *Stratasys*. Esta é a tecnologia de Impressão 3D mais utilizada, por ser bastante acessível e apropriada para impressão de peças e protótipos funcionais e mecânicos. O principal recurso deste tipo de impressoras é um fio de plástico enrolado num carretel. Este é chamado de filamento e geralmente está disponível com um diâmetro de 1,75 mm. Existem filamentos com diâmetros superiores, contudo o nível da precisão da impressão baixa com o aumento da espessura do filamento, pelo que a sua utilização não é recomendada. Quando comparada com outras tecnologias à base de resina ou pó, como a tecnologia SLA ou SLS, respetivamente, a utilização de filamentos é bastante mais segura e mais simples de trabalhar. Contudo, apresenta como desvantagem a visualização a olho nu das camadas dos objetos impressos, sendo que a altura normal de uma camada, ao utilizar um bico extrusor de 0.4 mm, está entre 0.05 e 0.3 mm.

As impressoras 3D FFF/FDM podem ser divididas em subcategorias que têm por base o movimento dos seus eixos no espaço tridimensional. A impressora que foi utilizada é do tipo Cartesiana que, como o seu nome indica, implica que o seu movimento se rege segundo as coordenadas dimensionais XYZ. Neste caso, o bico extrusor move-se segundo a direção X e a direção Z, enquanto a plataforma de impressão se move ao longo do eixo Y [62].

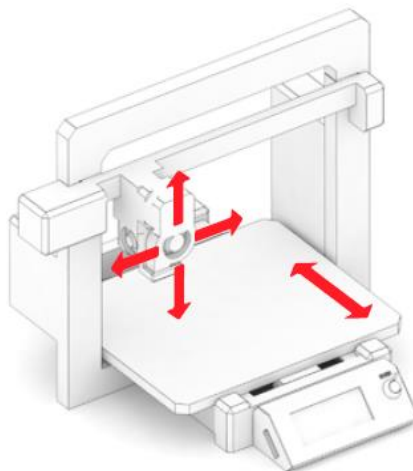


Figura 37 - Esquema ilustrativo do movimento de uma impressora 3D Cartesiana [62]

3.1.1.1. Principais Componentes

As impressoras 3D FFF apresentam, de uma forma geral, a mesma estrutura e componentes. A cabeça de impressão, ou o bico extrusor, é concebida para depositar as camadas do objeto a imprimir, extrudindo plástico derretido. Esta contém um tubo de PTFE (Politetrafluoretileno), por onde entra o fio do filamento, que neste ponto se encontra solidificado e à temperatura ambiente, e um dissipador de calor (*Heatsink*) projetado para dissipar o calor proveniente do corta-calor (*Heat break*) e minimizar a área de transição entre o filamento sólido e o derretido. Este último possui ainda uma ventoinha na lateral, para aumentar a eficiência do arejamento (*Print fan*). O corta-calor é essencialmente um troço de um tubo com uma rosca externa, mais estreita numa determinada extremidade, de forma a reduzir o diâmetro ao longo do seu comprimento. Desta forma reduz o calor proveniente do bloco de aquecimento (*Heater block*) que sobe em direção à área onde o filamento deve permanecer sólido. Este bloco é feito à base de materiais bons condutores térmicos, como o alumínio, e possui um pequeno elemento de

aquecimento elétrico junto com um termómetro, para medir a sua temperatura. Assim, o filamento é derretido no bloco de aquecimento e é empurrado para a saída, onde se encontra o bico (*Nozzle*). Este pode ter diferentes diâmetros, dado que é possível trocar o bico com um determinado diâmetro por outro distinto, o que pode conduzir a grandes benefícios para o aperfeiçoamento de uma peça que necessite de mais precisão e detalhe.

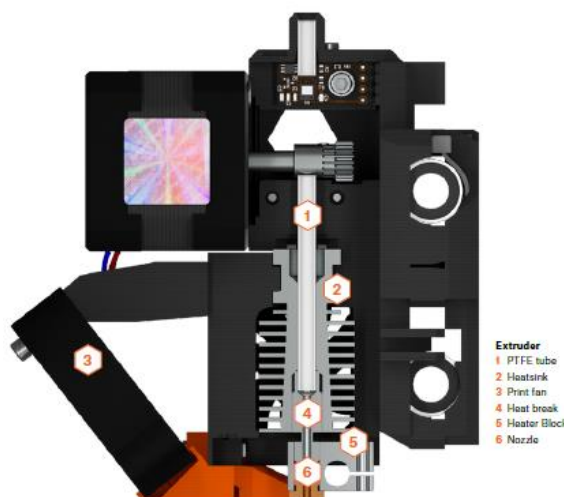


Figura 38 – Esquema ilustrativo da cabeça de impressão [62]

Na sua base, a impressora possui uma plataforma aquecida que é compatível com uma vasta gama de materiais e que previne que os objetos impressos se dobrem, deformem ou destaquem da superfície, aquando da sua extração da impressora. A estrutura de suporte (*frame*), ou a armação, é robusta e firme, de forma a minimizar vibrações e a imprimir mais rapidamente, sem que isso interfira com a qualidade das peças produzidas. A componente responsável pelo movimento de todos os eixos (os 2 eixos da cabeça de impressão e o da plataforma aquecida) denomina-se motor de passos (*Stepper Motors*), enquanto um outro motor controla o movimento do desenrolar do filamento. A principal vantagem do motor de passos é a sua capacidade de verificar a precisão de todas as etapas da impressão.

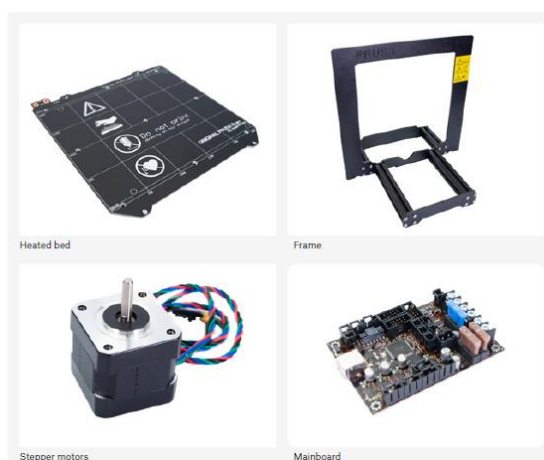


Figura 39 - Plataforma aquecida; Armação; Motor de passos; Placa principal [62]

Por último, a *Mainboard*, ou placa principal, é o elemento eletrónico com circuitos integrados que controlam toda a impressora. A sua principal função consiste em ler os ficheiros enviados para a impressora e controlar os motores, a plataforma aquecida (*heated bed*) e o bloco de aquecimento, com base nas instruções contidas no *G-code*, o código gerado a partir dos parâmetros definidos no programa de laminação e que a impressora lê através de um cartão de memória [62].

3.1.1.2. Especificações Básicas

A impressora *Original Prusa I3 MK3S* apresenta imensas vantagens como equipamento de Impressão 3D FDM de pequeno formato, dado que incorpora muitos recursos e características que facilitam todo o processo de preparação e de execução da impressão. Esta exhibe uma excelente estabilidade estrutural, incorpora sensores de correção de filamentos e de calibração dos eixos, botão de pânico para perdas inesperadas de energia elétrica, plataforma de impressão removível para melhor extração dos modelos, entre muitas outras. De seguida serão expostas as especificações mais relevantes relativamente à impressora disponível:

- Máximo volume de construção: 11.025 cm³ (25x21x21 cm);
- Diâmetro do bico extrusor (por defeito): 0.4 mm;
- Diâmetro dos filamentos : 1.75± 0.05 mm;
- Altura mínima de camada: 0.05 mm;
- Plataforma de impressão: removível, aquecida e com compensação de calor nos cantos;
- Máxima velocidade de impressão: 200 mm/s
- Impressão de multimateriais;
- Controlador LCD integrado;

3.1.1.3. Filamentos Compatíveis

À medida que a Impressão 3D FDM ou FFF se torna cada vez mais usual, têm surgido novos filamentos de diferentes materiais, de inúmeras cores e propriedades especiais. Atualmente, já existe uma vasta gama de filamentos a que o utilizador pode recorrer. Contudo, para cada tipo de material, é necessário realizar certas configurações específicas, sendo necessário atender às instruções dadas por cada fabricante. O mesmo material de diferentes fornecedores pode não exigir os mesmos requisitos e o mesmo material com cores diferentes pode também necessitar de configurações distintas.

Assim, para que a máxima qualidade de impressão seja garantida, deve configurar-se sempre a impressora de acordo com as instruções do fabricante dos filamentos, o que inclui, por exemplo, temperaturas (do bico e da plataforma), velocidade das ventoinhas, velocidade de impressão, fluxo do filamento, retração do material, entre outras. Apenas com a experiência e conhecimento sobre a impressora disponível é que se devem ajustar estes parâmetros, caso surjam defeitos visíveis na peça impressa com a utilização das configurações por defeito.

Os filamentos mais frequentemente utilizados são de PLA, PETG, ABS e FLEX. No entanto, existem bastante alternativas que poderão comportar-se de maneira diferente, algo que será sempre necessário verificar, tendo em conta os resultados que se pretendem. Desta forma, é necessário conhecer

bem as propriedades de cada material, bem como as situações ideais para a sua utilização, e respetivas definições na impressora [62].

Com o objetivo de simplificar a análise e a comparação entre os materiais de impressão mencionados, foi realizado um quadro síntese das propriedades e requisitos de cada um dos filamentos, assim como um quadro resumo geral, o qual será apresentado no final desta secção. Características como a resistência, durabilidade, flexibilidade e facilidade de impressão foram avaliadas de 1 a 5, sendo que o grau 1 significa “muito mau” e o 5 “muito bom”.

PLA

O PLA (ácido polilático) é um polímero termoplástico, biodegradável e biocompatível e um dos polímeros sintéticos mais promissores, dado que este pode ser obtido a partir de recursos renováveis, como cana-de-açúcar ou amido de milho. É o filamento mais utilizado na Impressão 3D, pois, além das suas propriedades sustentáveis, é fácil de imprimir, visto que não requer uma temperatura muito elevada de impressão nem se deforma facilmente, o que, por sua vez, também não requer uma temperatura elevada na plataforma de aquecimento. O acabamento da superfície é agradável e aceitável, mesmo até em pontes e saliências. Além disso, está disponível em imensas cores e características especiais, como filamentos à base de PLA com propriedades condutoras, brilhantes no escuro ou com infusão de madeira ou de metal.

Este filamento torna-se a escolha perfeita para imprimir peças grandes, devido à sua baixa expansão térmica (pouco ou nenhum empenamento) e para imprimir peças pequenas com bastante detalhe, devido à sua baixa temperatura de fusão. Além de todas estas vantagens, o filamento de PLA é um dos que apresenta menor custo por quilograma.

Porém, este material apresenta também algumas desvantagens. Em primeiro lugar, por ser bastante duro e quebradiço, tem fraca resistência ao desgaste e a impactos. Por outro lado, também não é muito resistente à temperatura, uma vez que começa a amolecer a uma temperatura de cerca de 60°C e, dos materiais mais usuais de impressão, é o que apresenta pior comportamento face a agentes climáticos. Desta forma, nestes casos é sempre preferível optar por filamentos de ABS ou PETG [62], [63], [64].

Material do Filamento	PLA
Propriedade Especial	Biodegradabilidade
Aplicabilidade	Protótipos e produtos grandes
Temperatura de Impressão	215-230 °C
Temperatura da Plataforma	50-60 °C
Solubilidade	Não Aplicável
Rigidez	3
Durabilidade	2
Flexibilidade	1
Facilidade de Impressão	5
Custo/Kg	20-30 €

Tabela 1 - Quadro síntese das características e requisitos do filamento de PLA [62], [63], [64]

PETG

O polímero PET (polietileno tereftalato) é o plástico mais utilizado em todo mundo. Este é conhecido por ser aplicado em garrafas de plástico, fibras de roupa e embalagens de comida. Contudo, o PET “puro” raramente é utilizado na Impressão 3D, pelo que foi substituído por uma sua variante – o PETG (modificado com glicol) –, resultando dessa substituição um filamento mais claro, menos quebradiço e mais fácil de imprimir do que na sua forma original.

Normalmente, o PETG é considerado um bom meio-termo entre o PLA e o ABS, dado que é um pouco mais flexível e durável que o primeiro e bastante mais fácil de imprimir do que o segundo. Este é um material bastante resistente ao desgaste, aos impactos e a altas temperaturas, sendo especialmente adequado para peças mecânicas e para uso interno e externo. A impressão de peças de grandes dimensões também não constitui um problema, pois, sendo um material com baixa expansão térmica, raramente provoca distorções. O PETG é dútil, pois possui a quantidade certa de flexibilidade, o que impede que as peças se quebrem sob pressão.

Por outro lado, é necessário ter em conta que o PETG é um material viscoso, o que o torna pegajoso durante a impressão. Isso significa que não é aconselhável o seu uso para estruturas de suporte, mas que apresenta uma boa adesão entre camadas. É também necessário tomar alguns cuidados com o armazenamento dos filamentos de PETG, como guardá-los num local fresco e seco, pois, sendo um material higroscópico, absorve a humidade do ar e isso pode afetar negativamente o seu desempenho. Apesar de ser um material muito resistente, arranha mais facilmente do que o ABS [63], [64].

Material do Filamento	PETG
Propriedade Especial	Resistência Física
Aplicabilidade	Peças de alto impacto ou pressão
Temperatura de Impressão	220-250 °C
Temperatura da Plataforma	50-100 °C
Solubilidade	Não Aplicável
Rigidez	4
Durabilidade	4
Flexibilidade	3
Facilidade de Impressão	4
Custo/Kg	30-50 €

Tabela 2 - Quadro síntese das características e requisitos do filamento de PETG [62], [63], [64]

ABS

O ABS (acrilonitrila butadieno estireno) é também um polímero termoplástico, tal como o PLA, pode ser derretido e cristalizado múltiplas vezes sem causar muita degradação, sendo talvez o segundo filamento mais utilizado no que toca à Impressão 3D. Este apresenta melhores características mecânicas do que o PLA, sendo, no entanto e sem dúvida, o mais difícil de imprimir. Devido à sua durabilidade e resistência física e térmica, é frequentemente encontrado em inúmeros bens domésticos e de consumo. É facilmente reconhecido, pois o seu uso é recorrente em tijolos da LEGO ou capacetes de bicicleta, constituindo, portanto, um material indicado para utilização exterior ou interior.

O ABS apresenta-se muito forte e resistente aos impactos por conter borracha sintética de resistência ao desgaste e daí a sua alta durabilidade e capacidade de suportar altas temperaturas. Contudo, os utilizadores devem estar atentos à elevada temperatura de impressão do filamento, à tendência do objeto impresso para se deformar durante o resfriamento e quando sujeito a vapores gerados na sua impressão, potencialmente perigosos e intensos.

Por último, o ABS é solúvel em acetona, o que pode ser extremamente útil, por exemplo, na junção das diversas partes imprimidas separadamente e no pós-processamento das peças. Além disso, as respetivas superfícies podem ser suavizadas com vapores de acetona.

De um modo geral, apesar das dificuldades de processamento, o filamento de ABS é um bom material de impressão, mas é particularmente útil na produção de objetos que são frequentemente manipulados, descartados ou aquecidos. Bons exemplos de aplicação são capas de dispositivos eletrónicos, peças de grande desgaste, pegas de ferramentas, componentes de acabamento automotivo e compartimentos elétricos [63], [64].

Material do Filamento	ABS
Propriedade Especial	Resistência Térmica
Aplicabilidade	Produtos finais e revestimentos térmicos
Temperatura de Impressão	210-255 °C
Temperatura da Plataforma	50-110 °C
Solubilidade	Aplicável
Rigidez	3
Durabilidade	3
Flexibilidade	1
Facilidade de Impressão	3
Custo/Kg	20-40 €

Tabela 3 - Quadro síntese das características e requisitos do filamento de ABS [62], [63], [64]

TPE ou FLEX

Materiais TPE (termoplástico elastómeros) ou FLEX (materiais flexíveis) são um grupo de plásticos que possuem propriedades elásticas, assemelhando-se um pouco à borracha (quando se dobram, não quebram). Estes são fabricados com níveis de dureza distintos mas, quanto mais macio ou flexível for o filamento, mais difícil será a sua impressão. Por essa razão, deve realizar-se um processamento lento e um caminho de impressão firme.

Por um lado, os filamentos FLEX conseguem suportar muito mais desgaste físico do que o ABS ou PETG, mas, por outro, apresentam um grau de dificuldade de impressão bastante superior que pode, no entanto, ser melhorado se combinando, por exemplo, com poliuretano (TPU) ou copoliéster (TPC). Estas duas variantes dos materiais TPE são um pouco mais rígidas, o que facilita a impressão. Também se mostram mais duráveis, conseguem reter melhor a sua elasticidade no frio e, no caso do TPC, apresentam uma maior resistência a produtos químicos, à radiação UV bem como ao calor (até 150°C).

Os filamentos flexíveis são ideais para criar objetos suscetíveis a muito desgaste, visto que podem ser dobrados, esticados ou comprimidos. Podem também ser utilizados para imprimir rodas de modelos de RC (rádio controlo), capas de aparelhos eletrônicos, blocos silenciosos, brinquedos e vestuário elástico. Além disso, comportam-se otimamente em ambientes mais adversos, como é o caso dos ambientes exteriores [62], [64].

Material do Filamento	FLEX
Propriedade Especial	Flexibilidade
Aplicabilidade	Peças resistentes e/ou flexíveis
Temperatura de Impressão	210-230 °C
Temperatura da Plataforma	30-60 °C
Solubilidade	Não Aplicável
Rigidez	3
Durabilidade	5
Flexibilidade	5
Facilidade de Impressão	3
Custo/Kg	30-50 €

Tabela 4 - Quadro síntese das características e requisitos do filamento de FLEX [62], [63], [64]

Nylon

O *nylon* é um material muito comum no setor industrial tradicional e é o filamento de preferência no mundo da Impressão 3D profissional, na medida em que garante, simultaneamente e com maior eficácia de resistência, flexibilidade e durabilidade. Além disso, assegura uma adesão entre camadas e pode ser tingido antes ou depois do processo de impressão, uma propriedade exclusiva deste material. Contudo, à semelhança do filamento de PETG, o de *nylon* também é higroscópico, logo deve ter-se alguns cuidados no seu armazenamento, caso contrário pode ter um impacto negativo na impressão.

Material do Filamento	Nylon
Propriedade Especial	Multifuncionalidade
Aplicabilidade	Peças de alto impacto, pressão e/ou flexíveis
Temperatura de Impressão	240-260 °C
Temperatura da Plataforma	70-100 °C
Solubilidade	Não Aplicável
Rigidez	4
Durabilidade	5
Flexibilidade	3
Facilidade de Impressão	3
Custo/Kg	30-60 €

Tabela 5 - Quadro síntese das características e requisitos do filamento de Nylon [62], [63], [64]

Por ser resistente ao atrito e à abrasão, o nylon pode ser utilizado para imprimir ferramentas, protótipos funcionais ou peças mecânicas, por exemplo, dobradiças, fivelas ou engrenagens. No entanto, a temperatura de impressão e do bico extrusor tende a ser bastante elevada e, normalmente, é um filamento caro [62],[64].

Polycarbonato

O polycarbonato (PC) é um dos filamentos de Impressão 3D mais resistente porque aguenta tanto grandes impactos como altas temperaturas (até cerca de 110°C), sendo, por isso, extremamente duradouro. A sua característica mais peculiar é a transparência, o que explica a sua utilização em produtos comerciais como vidro à prova de balas, máscaras de mergulho, ecrãs digitais, etc. Contudo, não deve ser confundido com o acrílico, pois este tende a quebrar ou a fissurar quando submetido a pressão. O PC é um material flexível (embora não tanto como o *nylon*), por isso dobrável, podendo por isso provocar deformações permanentes nas peças. À semelhança do *nylon* ou do PETG, este também é um material higroscópico, pelo que é necessário protegê-lo da humidade.

Assim, o PC é ideal para peças que necessitam de manter a sua força, resistência e forma, em ambientes com temperatura elevada, como por exemplo, em componentes elétricos, mecânicos ou de automação. Para aproveitar a sua transparência, o PC pode ser utilizado para imprimir objetos de iluminação, telas e qualquer outra aplicação que exija clareza ótica. A sua principal desvantagem é a necessidade de o imprimir a uma temperatura extremamente elevada, o que significa que quando a peça arrefecer pode sofrer algumas deformações [64].

Material do Filamento	PC
Propriedades Especial	Transparência
Aplicabilidade	Peças transparentes e/ou resistentes
Temperatura de Impressão	270-310 °C
Temperatura da Plataforma	90-110 °C
Solubilidade	Não Aplicável
Rigidez	5
Durabilidade	4
Flexibilidade	2
Facilidade de Impressão	3
Custo/Kg	30-60 €

Tabela 6 - Quadro síntese das características e requisitos do filamento de PC [62], [63], [64]

Além dos seis materiais que foram analisados, e que são considerados os mais importantes e capazes para o uso da Impressão 3D, existem muitos outros que podem ter características mais invulgares e que têm particular interesse pelo seu acabamento, composição ou funcionalidade. Contudo, estes tendem a ser substancialmente mais caros (≥ 50 €/kg).

Por exemplo, os materiais compósitos aliam o plástico com outros materiais secundários, de forma a conferir à peça impressa um aspeto alternativo, como de madeira, metal ou cobre. No entanto, quando se utilizam estes tipos de filamentos, é essencial substituir regularmente o bico extrusor, pois os

pós dos materiais secundários tendem a ser bastante abrasivos. No caso de filamentos com madeira, deve aumentar-se o diâmetro do bico (0.5-0.6 mm) porque as lascas do pó de madeira podem entupir-lo.

Por outro lado, existem também filamentos cuja principal vantagem é serem biodegradáveis. Não são filamentos ideais para peças que exijam muita resistência, flexibilidade ou durabilidade (nesse caso, é preferível o PLA), mas são principalmente indicados para projetos de prototipagem ou experimentais, dado que estes geralmente envolvem muito desperdício de plástico, o que é altamente prejudicial para o meio ambiente.

Em termos funcionais, os filamentos mais interessantes são os que apresentam condutividade elétrica (adicionando ao PLA ou ABS partículas de carbono é possível imprimir circuitos elétricos de baixa tensão) ou propriedades magnéticas (adicionando ao PLA ou ABS ferro em pó, torna as peças capazes de aderir a ímãs e proporciona-lhes um aspeto metalizado) [62], [64].

Assim, este quadro síntese pretende ilustrar apenas os seis materiais principais de Impressão 3D considerados e analisados ao longo deste capítulo. Daí se conclui que, para peças resistentes e robustas, os filamentos ideais são de PC, PETG e *nylon* e, para objetos com durabilidade e flexibilidade elevada, os de PETG, FLEX e *nylon*. Os filamentos mais fáceis de imprimir são os de PLA e PETG e os mais baratos são os de PLA e ABS. O único material capaz de ser dissolvido (em acetona) é o ABS e o único biodegradável é o PLA. Considerando estes aspetos, a decisão sobre a escolha do filamento adequado torna-se mais clara, pelo que é necessário antever os pré-requisitos que a peça a imprimir necessita de cumprir.

Material do Filamento	Propriedade Especial	Aplicabilidade	Temperatura de Impressão	Temperatura da Plataforma	Solubilidade	Rigidez	Durabilidade	Flexibilidade	Facilidade de Impressão	Custo/Kg
PLA	Biodegradabilidade	Protótipos ou produtos grandes	215-230 °C	50-60 °C	Não Aplicável	3	2	1	5	20-30 €
PETG	Resistência Física	Peças de alto impacto e/ou pressão	220-250 °C	50-100 °C	Não Aplicável	4	4	3	4	30-50 €
ABS	Resistência Térmica	Produtos finais e revestimentos térmicos	210-255 °C	50-110 °C	Aplicável	3	3	1	3	20-40 €
FLEX	Flexibilidade	Peças resistentes e/ou flexíveis	210-230 °C	30-60 °C	Não Aplicável	3	5	5	3	30-50 €
Nylon	Multifuncionalidade	Peças de alto impacto, pressão e/ou flexíveis	240-260 °C	70-100 °C	Não Aplicável	4	5	3	3	30-60 €
PC	Transparência	Peças transparentes e/ou resistentes	270-310 °C	90-110 °C	Não Aplicável	5	4	2	3	30-60 €

Tabela 7 - Quadro síntese geral das características e requisitos dos 6 filamentos principais de Impressão 3D [62], [63], [64]

No entanto, a seleção dos filamentos a utilizar não fica por aqui. É igualmente necessário ponderar qual o material mais adequado para as estruturas de suporte de que o modelo a imprimir pode necessitar e deve sempre tentar-se evitar ou minimizar o seu uso. Para o efeito, existem duas opções: utilizar o mesmo filamento de impressão, ajustando a densidade das estruturas de suporte de Impressão 3D e torná-la muito menor do que a densidade do próprio modelo; ou, no caso de a impressora ser multimaterial, empregar filamentos solúveis, tais como PVA (álcool polivinílico) ou HIPS (poliestireno de alto impacto). No primeiro caso, a única forma de retirar as estruturas de suporte do modelo é

quebrando-as manualmente ou cortando-as cuidadosamente com recurso a uma faca ou similar, existindo, contudo, o risco de danificar o modelo e de a sua superfície carregar traços do material partido. No segundo caso, o parâmetro de distância entre as estruturas de suporte e o modelo deixa de fazer sentido, pois simplesmente basta dissolver o material secundário. No caso do PVA, este pode dissolver-se facilmente em água e funciona melhor quando aplicado em conjunto com filamento de PLA. Relativamente ao filamento de HIPS, este apresenta-se como um material de suporte solúvel em limoneno, uma substância química orgânica e natural derivada de cítricos, e funciona melhor quando combinado com filamento de ABS. Nestes dois casos, basta mergulhar a peça impressa no dissolvente apropriado. Desta forma, o risco de degradar a peça é bastante mais reduzido, o que facilita também a sua fase de pós-processamento. Contudo, como já mencionado, este método apenas funciona com impressoras multimateriais, que é o caso da impressora 3D disponível [62], [65].

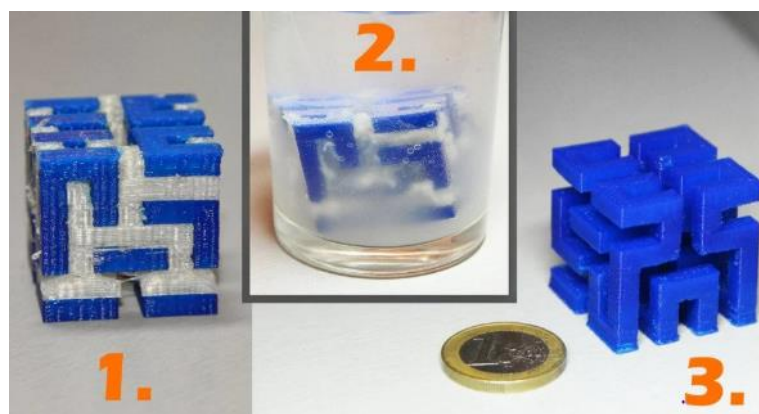


Figura 40 - Exemplo da dissolução das estruturas de suporte em HIPS [65]

3.1.2. PROGRAMAS DE PROCESSAMENTO

Como já explicado no capítulo anterior, a metodologia de Impressão 3D pode ser dividida em 3 passos. O primeiro consiste na obtenção do modelo CAD 3D de um objeto passível de impressão. De seguida, é necessário preparar esse modelo para impressão e, por fim, dá-se a impressão do objeto, propriamente dita.

É possível adquirir um modelo CAD 3D através de plataformas digitais específicas, recorrendo a aparelhos de digitalização 3D, através da Fotogrametria ou produzindo o próprio modelo num programa de modelação 3D. Para projetos experimentais ou até mesmo profissionais, a Digitalização 3D – criação de um objeto digital com base num objeto real – pode ser bastante útil, contudo ainda é uma tecnologia que exige aparelhos demasiado caros. Por outro lado, a Fotogrametria é um processo bastante mais barato e produz basicamente o mesmo efeito. A diferença está no seu processo, que é um pouco mais complexo, dado que este consiste em processar dezenas ou centenas de fotografias de um só objeto num programa específico. Para peças únicas, experimentais ou simplesmente criativas, a modelação 3D é o método mais prático. Para o efeito, é necessário criar o objeto num programa próprio e que, para o caso de projetos de Impressão 3D, tenha a funcionalidade de exportação do modelo para formatos de Fabricação Aditiva, como STL, AMF ou OBJ.

Contudo, os formatos de FA não são reconhecidos pelas impressoras 3D, pelo que não se pode imprimir diretamente a partir deles. Assim, é necessário preparar o modelo, neste caso em formato STL,

utilizando um programa de laminação. É neste programa que o modelo 3D é dividido em camadas, que os parâmetros e configurações de impressão são definidos e em que se estabelece as relações e proporções geométricas do objeto. Existem já muitos programas de laminação disponíveis no mercado, logo é essencial optar pelo mais adequado para um determinado projeto e para as condições de trabalho disponíveis, dado que cada um destes programas apenas é compatível com um número limitado de impressoras.

Quando importado o ficheiro STL para um programa de laminação, e após terem sido feitos todos os ajustes necessários tanto quanto à impressão como ao modelo, exporta-se o ficheiro em *G-code*, a linguagem informática específica de Impressão 3D e, por isso, aquela que as impressoras 3D reconhecem. Nele o modelo encontra-se já fatiado em várias camadas muito finas e todos os comandos de movimento que a impressora deve ler bem como toda a informação indispensável para a impressão (informação sobre temperaturas, configurações de arrefecimento, entre outras) [62].

Desta forma, foi realizado um breve estudo dos principais programas disponíveis no mercado, preferencialmente gratuitos e de código aberto que pudessem corresponder às necessidades e competências exigidas pelo projeto experimental em estudo.

3.1.2.1. Programas de Modelação 3D

Das dezenas de programas informáticos de Modelação CAD 3D que existem, foram considerados apenas dois para esta dissertação – o *AutoCAD* e o *Revit*, ambos da *Autodesk*. Estes foram selecionados porque são recorrentemente utilizados em diversas áreas profissionais relacionadas com a IC em Portugal, porque são capazes de exportar modelos 3D sólidos para o formato STL e também porque estão disponibilizados gratuitamente para estudantes.

Ambos os programas podem ser aplicados em projetos de formato e de construção de edifícios, mas, apesar de todas as suas semelhanças, são ferramentas com finalidades diferentes. Enquanto o *AutoCAD* é um programa de desenho generalista auxiliado por computador, para produzir representações 2D e 3D, o *Revit* é um programa direcionado para a metodologia BIM (*Building Information Modeling*), um modo de gestão de projetos ao qual são adicionados instrumentos para criar modelos tridimensionais inteligentes de edifícios, os quais podem também ser utilizados como documentação legal num projeto de construção. Ambos os programas são interoperáveis e podem ser usados em conjunto, por exemplo, para incorporar componentes de um formato criados no *AutoCAD*, num projeto *Revit*, para gerar produtos BIM e permitir assim a colaboração com outras especialidades presentes no projeto [66].

Uma particularidade interessante e bastante útil do *Revit* é o facto de todos os elementos criados nos seus projetos serem categorizados por famílias de objetos. Estas tanto podem ser famílias 3D (como elementos estruturais, paredes, portas, tubagens, etc.), como 2D (legendas, molduras de apresentação, notas, tabelas, etc.). Assim, uma família Revit é um grupo de elementos que têm em comum um conjunto de propriedades, designados de “parâmetros” (*parameters*) e uma representação gráfica proporcional. Ou seja, diferentes elementos pertencentes à mesma família podem ter diferentes valores em alguns parâmetros, ou mesmo em todos eles, embora esse conjunto de parâmetros (o seu nome e significado) seja o mesmo. A essas variações dá-se o nome de “tipos de famílias” (*family types*). Por exemplo, é possível criar uma família de parafusos, com uma forma geométrica padrão, e definir como parâmetros o diâmetro da rosca, o diâmetro da cabeça do parafuso, o comprimento e todas as medidas geométricas que poderão sofrer alterações consoante o tipo de parafuso, o qual pode variar de acordo com a sua

dimensão. Desta forma é possível realizar alterações à geometria de um objeto com facilidade e gerir os modelos com mais eficiência [67].

Para a concretização deste estudo, estas e outras funcionalidades e aplicações foram descritas no quadro da tabela 8, reunindo assim as principais características dos programas escolhidos para a elaboração das peças 3D a imprimir.

Articulando os dois programas em conjunto e tirando partido das melhores qualidades de cada um deles, a elaboração dos modelos das aplicações em estudo tornou-se mais eficiente, dado que todos os elementos 2D foram concretizados no *AutoCAD* e a sua conversão para modelos tridimensionais foi realizada no *Revit*, bem como a respetiva criação de famílias para alguns modelos, como será apresentado mais à frente.

<i>Softwares</i>	<i>AutoCAD</i>	<i>Revit</i>
Aplicações	Esboços e desenhos 2D Modelação e visualização 3D	Design arquitetónico Engenharia estrutural Componentes mecânicas, elétricas e hidráulicas Pré-fabricação
Ferramentas	Criação e edição de geometrias 2D Criação e edição de modelos 3D Anotação de desenhos com texto, dimensões, legendas e tabelas Personalização com aplicativos complementares (<i>Add-ins</i>) Criação e personalização de categorias de traçado (<i>layers</i>) Extração de dados do modelo para tabelas Anexação e importação de dados de ficheiros PDF Partilha e utilização de dados de ficheiros DGN, Navisworks e Bing Maps Aplicação e monitorização de padrões CAD	Modelação paramétrica 3D Documentação detalhada do projeto Coordenação Multidisciplinar Modelação automática de elementos construtivos, mecânicos, elétricos e hidráulicos Análise e simulação de sistemas e estruturas Criação de famílias parametrizadas de objetos Criação automática de mapas de quantidades Divisão do projeto em fases sequenciais Visualização 3D fotorrealista

Tabela 8 – Principais características dos programas de modelação 3D: *AutoCAD* vs *Revit* [66]

3.1.2.2. Programa de Laminação

As várias predefinições contidas no código *G-code* englobam diversas matérias como a resistência do modelo, a quantidade de detalhe e a velocidade de impressão. Além disso, nos programas de laminação é possível modificar o objeto modelado como, por exemplo, em termos de escala, corte ou rotação e, assim, posicioná-lo corretamente na plataforma de impressão virtual. Ou seja, para uma peça ser impressa com sucesso, é essencial definir as configurações corretamente, bem como optar pelo melhor programa para uma determinada situação. Todos eles possuem as suas vantagens e desvantagens, e muitos já se encontram disponíveis gratuitamente. No entanto, é aconselhável que os utilizadores iniciantes utilizem o programa que apresenta as ferramentas e os perfis de laminação previamente configurados e testados para as suas impressoras em específico, pois paticamente todos os principais fabricantes de impressoras 3D têm o seu próprio programa de laminação completamente ajustado para a sua gama de produtos.

Desta forma, o programa escolhido para a realização do projeto da presente dissertação foi o *PrusaSlicer*, exatamente por ser o programa de laminação padrão da *Prusa Research*, por ser gratuito e de código aberto. Este é regularmente atualizado, pelo que está constantemente a sofrer melhorias e otimizações. Apresenta mais de 30 perfis testados para vários filamentos, configurações de impressão simples e de multimateriais, e integração da interface *OctoPrint*, o qual permite controlar e monitorizar todos os aspetos da impressora. Este possibilita também a pré-visualização do modelo fatiado, bem como de cada camada de cada vez, assim como a sua respetiva configuração. Por último, este programa é um bom programa de laminação no que respeita à criação de estruturas de suporte. De seguida, serão apresentadas e explicadas as configurações básicas que o programa incorpora e os efeitos que estas têm na qualidade de impressão de um modelo [62].

Temperaturas de impressão e da plataforma aquecida

Geralmente, os fabricantes de filamentos de Impressão 3D providenciam informação sobre as temperaturas ideais recomendadas para os seus produtos e, por isso, devem manter-se os seus valores, caso contrário, a sua modificação poderá levar a alterações inesperadas no visual do modelo impresso. Para a maioria dos filamentos, a temperatura do bico extrusor varia entre os 200 °C e 240 °C e a temperatura da base de impressão entre os 60 °C e 100 °C [62].

Altura das camadas

Esta definição consiste na regulação do movimento da impressora, em relação ao seu eixo Z, e tem um grande impacto tanto no tempo de impressão da peça como no acabamento geral da sua superfície. Por norma, quanto mais altas forem as camadas mais visíveis serão e mais rápida é a impressão. Este efeito torna-se bastante mais evidente em superfícies paralelas, ou quase, à plataforma de impressão. Por outro lado, para impressões mais detalhadas e lisas é preferível aplicar camadas muito finas, embora isso estenda o seu tempo de impressão. Assim, a espessura recomendada na maioria das vezes para as diferentes camadas varia de 0.15 a 0.2 mm. O *PrusaSlicer* dispõe ainda de uma ferramenta que permite configurar a altura variável da camada. Tal significa que os utilizadores podem escolher quais as partes do objeto que terão camadas de alturas inferiores (partes detalhadas ou inclinadas) e quais as secções que podem ter camadas mais espessas. A imagem seguinte demonstra como diferentes definições da altura das camadas, para a mesma peça, podem gerar diferentes resultados no acabamento das superfícies, bem como no tempo de impressão [62].



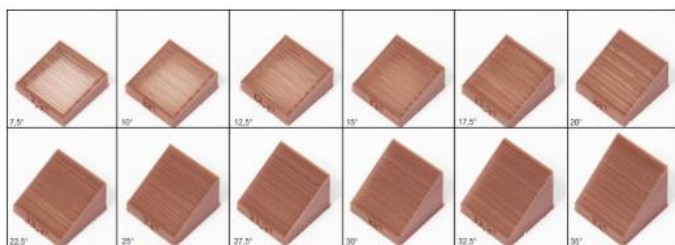
Figura 41 – Influência da altura das camadas no acabamento das superfícies e no tempo de impressão [62]

Perímetros

Os perímetros do modelo são contabilizados através da definição das suas paredes externas verticais, o que significa que o número fornecido de perímetros indica a quantidade de linhas que formarão essas paredes. Estas apresentam uma espessura aproximadamente igual ao número de perímetros multiplicado pelo diâmetro do bico. Assim, para uma parede mais espessa, será necessário mais material e mais tempo de impressão, pelo que só interessa aumentar o número de perímetros em ocasiões específicas, como na impressão de superfícies ligeiramente inclinadas, sem recurso a nenhum preenchimento ou suportes (peças ocas). Contudo, neste caso, podem surgir alguns contratempos, devido ao facto de o bico extrusor ser forçado a depositar fibras únicas no vazio, provocando incongruências no modelo, que apenas podem ser evitadas aumentando a espessura das paredes o que, por sua vez, aumenta o número de perímetros. Assim, é importante realizar vários testes de impressão de secções críticas da peça até se alcançar a configuração ideal [62], [68].



PERIMETERS: 2



PERIMETERS: 5

Figura 42 – Influência do número de perímetros na configuração da peça [62]

Camadas sólidas

Este parâmetro define as paredes horizontais do modelo, isto é, o seu número de camadas superiores e inferiores. Estas serão completamente sólidas e apresentarão uma percentagem de preenchimento igual a 100% [62].

Densidade de Preenchimento

Diferentes percentagens e formas de preenchimento podem ter influência no tempo de impressão, na durabilidade do objeto a imprimir e na quantidade de material nele despendido. Assim, ao definirmos uma percentagem de 0% de preenchimento, estamos a pré-definir um objeto totalmente oco. No entanto, de uma forma geral, define-se um valor entre os 10-20%. Relativamente ao padrão de impressão, este deve ser escolhido consoante a resistência ou a flexibilidade que se pretende conferir ao objeto e a sua densidade depende da percentagem de preenchimento pré-definida, como se pode observar na Figura 43 [62].

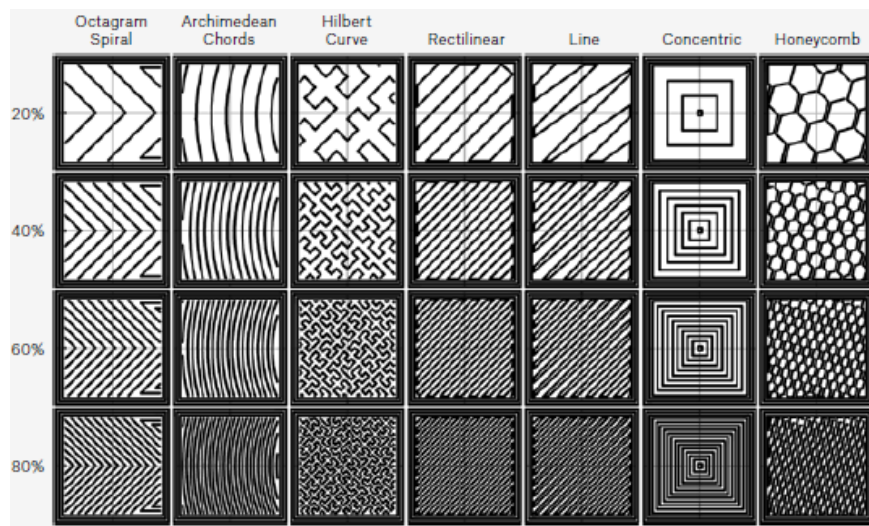


Figura 43 - Influência no padrão de preenchimento consoante sua densidade [62]

Estruturas de Suporte

Como já anteriormente mencionado, as estruturas de suporte assemelham-se a andaimes que sustentam oscilações ou peças sem apoios. Estas são concebidas para que sua remoção seja efetuada facilmente, podendo porém deixar vestígios no modelo. Logo, o principal objetivo é evitar ao máximo a sua utilização, projetando o objeto segundo uma orientação que anule a sua necessidade ou que a minimize. Quanto menor for a utilização das estruturas de suporte, mais rápida se realizará a impressão e melhor será a aparência global do modelo. No caso do *PrusaSlicer*, este tem uma opção para gerar material de suporte automaticamente e ainda definir o ângulo mínimo para a impressão de saliências no modelo sem recorrer a estas estruturas. Se este ângulo for definido como zero, o próprio programa irá detetar as zonas problemáticas autonomamente e apenas imprimir os suportes quando necessário. A opção de impor os suportes deve ser apenas utilizada no caso de modelos pequenos ou com uma base pequena, pois neste caso a sua utilização impede a peça de se partir aquando da sua execução ou que se rasgue na sua retirada da plataforma [62], [69].

Pontes

A criação de pontes (*bridging*) constitui um caso especial em que a impressora consegue imprimir uma camada no ar sem necessidade de recorrer a suportes por baixo da mesma. Nestas situações, o bico extrusor é capaz de arrastar uma corda de plástico, esticando-a entre dois pontos sólidos. No entanto, para isso, é obrigatório que a ponte seja totalmente paralela à plataforma de impressão. O comprimento do vão máximo dessa ponte depende das definições de refrigeração da impressora 3D [62].

Borda

A borda (*brim*) tem como objetivo aumentar a adesão do objeto à mesa de impressão, especialmente no caso de peças muito pequenas ou muito finas, adicionando mais uma superfície plana que evita a deformação ou a desanexação das componentes do objeto, aquando da sua impressão. Portanto, deve-se considerar o uso da definição de bordas no *PrusaSlicer*, caso seja então necessário aumentar a área da superfície da primeira camada do modelo. No final da impressão, esta é facilmente removida [62], [69].

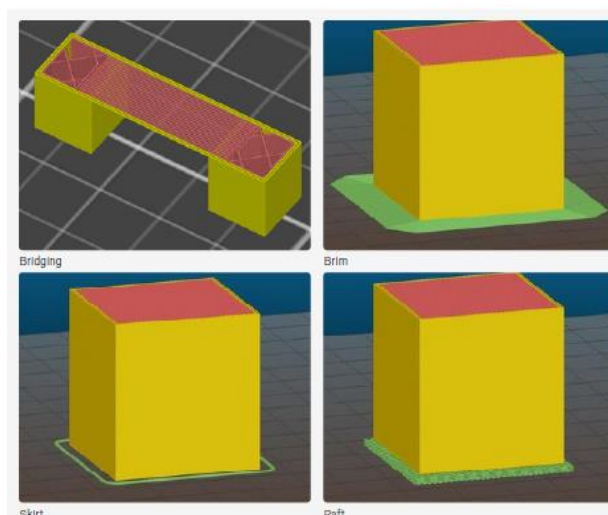


Figura 44 – Exemplos de objetos com pontes, borda, saia e sob jangada [62]

Saia

Ao contrário da borda, a saia (*skirt*) não fica em contacto com o objeto. Esta é definida por uma linha muito fina ao seu redor e pode ser constituída por mais de uma camada. No entanto, a sua utilização é mais recorrente na impressão de ABS, pois este material tem uma grande tendência para encolher e fissurar quando arrefece. Logo, a saia depositada na plataforma cria um microclima, o que ajuda a bloquear a circulação de ar frio. Além disso, esta também pode servir como teste para verificar se a primeira camada depositada está a aderir adequadamente à plataforma. Caso contrário, é um sinal de que é necessário calibrar a posição do valor Z relativamente à primeira camada, na própria impressora [62].

Jangada

A jangada (*raft*) é uma estrutura de suporte especial opcional que levanta todo o modelo um pouco acima da plataforma de impressão. É utilizada essencialmente quando se imprime com ABS, porque, à semelhança da borda, previne a deformação ou o levantamento do objeto da mesa de impressão [62].

Resfriamento

A utilização da opção de resfriamento ativo (*cooling*) do objeto é amplamente aconselhável e vem já ativada por defeito. É principalmente importante em estruturas finas e altas que, geralmente, não têm tempo suficiente para esfriar naturalmente, devido ao facto de o bico extrusor se encontrar a temperaturas muito elevadas e tender a permanecer muito tempo na mesma área [62].

Configurações avançadas

O *PrusaSlicer* ainda possui uma série de outros parâmetros passíveis de ajustamento, como por exemplo, velocidades para perímetros ou pontes, enchimentos, retrações, entre muitos outros. No entanto, estas configurações já são definidas por defeito em fábrica, dependendo do material e do bico extrusor selecionados, pelo que não é necessário ajustá-los ainda mais [62].

3.2. CASOS DE ESTUDO – APLICAÇÕES NA CONSTRUÇÃO

O equipamento de impressão 3D disponível insere-se num gama de impressoras designadas por “*desktop 3D printers*” que, como o próprio nome indica, são impressoras que se colocam e adequam perfeitamente a mesas, como balcões ou secretárias, tornando-as muito acessíveis e práticas, sobretudo pelo seu tamanho e custo reduzidos (neste caso, a impressora disponível ocupa 55x40x50 cm). Estas foram inicialmente concebidas para o mercado do consumidor, no entanto, na última década, a sua utilização sofreu uma revolução, no sentido em que esta tecnologia passou a ser muito interessante também para o mercado profissional industrial. Ao proporcionarem uma produção rápida e barata, as impressoras de baixo custo tornaram-se essenciais para qualquer sistema industrial, embora a um nível pessoal, principalmente nas áreas de prototipagem rápida, produção de ferramentas e de pequenas peças finais. No entanto, estas apresentam algumas limitações quando comparadas às impressoras 3D industriais de grande formato, o que significa que não as substituem na sua função. Estas últimas devem ser consideradas para projetos que exigem tolerâncias inferiores a ± 1 mm, materiais de engenharia com propriedades específicas (resistência ao calor, a produtos químicos, etc.) ou um tamanho de construção grande (maior que 200x200x200 mm). Portanto, as impressoras 3D de mesa são especialmente recomendadas para prototipagem e aplicações que visam a criação, substituição ou reparação de peças pequenas [70], [71].

Como comprovado no capítulo 2, também na Indústria da Construção existe espaço para a utilização de impressoras 3D de pequena escala, quer para a produção de protótipos (como maquetes estruturais e arquitetónicas ou as espumas para isolamento térmico), como para a produção de peças finais (como os *Cool Brick* ou os nós metálicos). Assim, foram analisadas para o presente estudo algumas aplicações que a impressora 3D disponível pode efetivamente concretizar com sucesso, revelando o seu potencial e interesse para a sua presença em empresas de construção ou de pré-fabricação.

3.2.1. CRITÉRIOS DE SELEÇÃO

Nas últimas duas décadas, a Impressão 3D tem vindo a ser amplamente utilizada como método de prototipagem rápida, que passou a ser uma abordagem essencial na criação e no desenvolvimento de qualquer produto, como forma de transmitir ou comprovar fisicamente um determinado conceito [72]. No entanto, este estudo foca-se também na possibilidade da utilização de uma impressora 3D de mesa para impressão de peças finais, como pequenos componentes industriais e ferramentas que todas as empresas de construção necessitam de adquirir e utilizar nas suas obras. Por outro lado, a sua capacidade de teste e validação de novos produtos, também associados à IC, foi igualmente ensaiada, compreendendo e analisando as limitações que a tecnologia de Impressão 3D FDM ainda comporta.

Objetivos da impressão

A fim de facilitar uma avaliação apropriada dos resultados obtidos com a impressão das peças selecionadas para este projeto, foram inicialmente estabelecidos três objetivos principais. Estes tiveram de ser cumpridos, para que o formato dos modelos fosse considerado bem-sucedido [72]. Assim, foi necessário:

- garantir o dimensionamento correto ou proporcional do tamanho real dos componentes;
- providenciar tolerâncias geométricas acomodadas para a fabricação dos componentes;
- satisfazer a aplicabilidade dos componentes.

Características consideradas

De forma a possibilitar a funcionalidade das peças escolhidas, teve-se em consideração:

- o tamanho real dos componentes;
- as cargas físicas a que os componentes possam estar sujeitos;
- as diferenças térmicas a que os componentes possam estar sujeitos;
- as condições ambientais do componente;
- a vida útil do material;
- a reatividade química do material;
- a viabilidade económica do material;
- a dificuldade de fabricação.

3.2.2. CASOS DE ESTUDO

Por norma, um projeto de construção engloba vários projetos de especialidades diferentes, como os de estruturas, hidráulica, AVAC (aquecimento, ventilação e ar condicionado), eletricidade e arquitetura, e os elementos que compõem os seus sistemas, geralmente complexos, são compostos e construídos graças a pequenos acessórios ou peças fabricadas industrialmente e em grandes quantidades. Estes podem ser úteis tanto para assegurar o bom funcionamento do sistema como para sustentar a sua correta implementação em obra ou até mesmo para garantir a segurança de todos os intervenientes na sua montagem. Assim, apesar de algumas peças serem apenas complementos secundários de um determinado sistema, a sua presença é imprescindível para que esse exponha um desempenho aceitável.

Apesar de a sua fabricação e venda ser em grande escala, e por isso os preços dos mesmos serem facilmente comportados pelas empresas, muitas vezes é necessário adquirir apenas uma pequena quantidade e, nesse caso, a encomenda deste tipo de produtos pode já não compensar, resultando em

gastos desnecessários ou no aumento de armazenamento não prioritário. Uma correta gestão do armazenamento implica a redução da variabilidade de todos os processos, o que significa que todos os materiais ou equipamentos devem estar disponíveis apenas quando realmente são requeridos, pois o seu armazenamento compulsivo não agrega valor considerável às empresas. Por outro lado, quando a gestão dos recursos falha, pode acontecer que a quantidade solicitada não corresponda às verdadeiras necessidades da construção. Nesta situação, seria necessário realizar uma nova encomenda ao fornecedor, o que pode levar algum tempo até ser concretizada e, portanto, causar atrasos na execução de uma tarefa e arruinar a produtividade da obra a que se destina [73].

Assim, para o presente estudo, foram consideradas pequenas peças fabricadas à base de plástico que podem comprometer a realização de sistemas construtivos e cuja solicitação unitária não é normalmente praticável. Por isso, foram considerados alguns acessórios de dois tipos de sistemas: (1), estruturas de betão armado e (2), instalações hidráulicas.

Acessórios para fabrico de betão armado

As cofragens correspondem aos “moldes” que suportam o betão fresco e que proporcionam a forma final pretendida para um determinado elemento construtivo (pilares, vigas, lajes, etc.), durante o período de tempo em que o betão ainda não possui a resistência necessária para se autossustentar. Trata-se de construções provisórias, de montagem e desmontagem simples e que devem ser preferencialmente reutilizadas em diferentes obras [74].

Quando o betão é armado, o que lhe confere uma elevada resistência à tração, é necessário considerar vários fatores como, por exemplo, o afastamento necessário entre as armaduras e respetivos agrupamentos, de forma a assegurar entre estas a passagem adequada de agregados mais grossos, durante a betonagem. As armaduras necessitam de ficar envolvidas em betão, garantido o recobrimento nominal mínimo, de forma a evitar que agentes corrosivos como cloretos, água ou dióxido de carbono afetem rapidamente a armadura que, por ser em aço, tem tendência a oxidar, o que pode também degradar consideravelmente o betão. Portanto, é de extrema importância assegurar o correto recobrimento das armaduras que deve ser definido no projeto de estruturas. A distância de recobrimento depende tanto da classe do betão como do elemento estrutural em causa e da sua classe de exposição ambiental. Ainda que, quanto maior for o recobrimento, maior será a proteção das armaduras, este não pode ser sobredimensionado, pois a zona do recobrimento não possui armaduras, podendo o betão fissurar por essa razão.

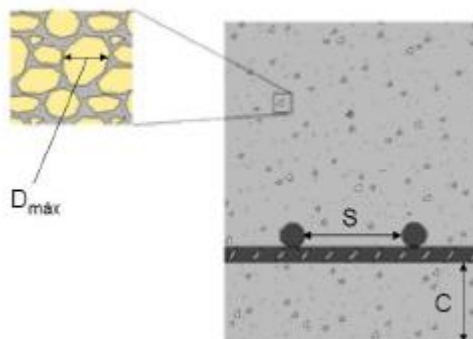


Figura 45 - Espaçamento mínimo entre armaduras (S); Recobrimento nominal (C) [75]

De forma a garantir o espaçamento entre as armaduras e as cofragens, são colocadas peças designadas por espaçadores, separadores ou distanciadores que, no final da betonagem, não são recuperáveis, pelo que necessitam de ser compatíveis com o betão. Existem no mercado separadores para várias distâncias de recobrimento, tanto para armaduras verticais como horizontais, que podem ser fabricados com argamassa de cimento ou plástico. Estes ficam presos à armadura aquando da betonagem e consequente vibração do betão, não permitindo que a armadura se mova e assegurando a distância mínima de recobrimento. Os vários tipos de espaçadores que existem, as suas características e todos os seus parâmetros de utilização e conceção encontram-se pormenorizados na Especificação “LNEC E 469-2006 – Espaçadores para armaduras de betão armado” [75].

Segundo a especificação referida, os separadores podem ser de plástico, mas apenas em elementos estruturais submetidos às classes de exposição ambiental X0, XC1 e XC2, definidas na Norma Portuguesa “NP EN 206-1:2007 – Betão. Parte 1: Especificação, desempenho, produção e conformidade”. O seu dimensionamento deve ter em conta as diferentes formas geométricas que as armaduras dos elementos estruturais exigem, assegurando sempre a estabilidade suficiente quando apropriadamente afixados ao longo das mesmas ou nas suas extremidades. Logo, os espaçadores de plástico devem ter as dimensões acomodadas para suportar as cargas previstas e satisfazer os recobrimentos nominais definidos na Especificação LNEC E 464-2007, isto é, de 20 a 65 mm [76].

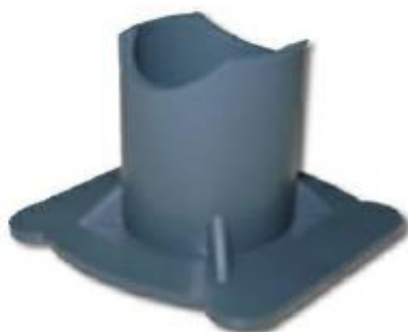


Figura 46 - Espaçador pontual para armaduras horizontais [75]



Figura 47 - Espaçador circular para armaduras verticais [75]

Assim, uma das aplicações selecionadas para o presente estudo da utilização da Impressão 3D são os espaçadores de cofragens de betão armado. Além destes, foi também considerada a impressão de cápsulas de segurança e sinalização de varões de ferro pertencentes a armaduras que se apresentam fora das estruturas de betão. A utilização deste tipo de acessórios é obrigatória, segundo as regras definidas no REBAP (Regulamento de Estruturas de Betão Armado e Pré-esforçado) e na Norma “NP ENV 13670:2011 – Execução de estruturas de betão”, para a verificação das tarefas de moldagem e inspeção de armaduras. Estas preveem tanto a colocação de espaçadores em argamassa para garantir o recobrimento das armaduras, como a colocação dos protetores de pontas de ferro, comumente denominados de “cogumelos plásticos” e a respetiva verificação das secções e número de varões [77].



Figura 48 - Cogumelos de plásticos de sinalização [78]

As cápsulas ou cogumelos de plástico são utilizados sobretudo para assegurar a proteção de pessoas contra ferimentos causados pelas pontas dos varões do aço do betão armado. Contudo, também podem ter um papel de identificação das secções desses varões, de forma a facilitar a sua contagem e fiscalização. De um modo geral, estes dispositivos estão apenas disponíveis numa ou duas cores e só possuem dois tamanhos diferentes. Por exemplo, cogumelos para varões com diâmetros entre 6 e 16 mm e outros para diâmetros entre 16 e 32 mm. Por esta razão, seria interessante imprimir vários cogumelos para diâmetros de varões específicos, de forma a tornar mais óbvio o seu reconhecimento, tanto por parte dos trabalhadores como dos engenheiros de fiscalização e de direção de obra.

Como já mencionado, as cápsulas de sinalização são fabricadas à base de plástico e, ademais, conforme as exigências da diretiva europeia 89/686 (Marcação CE), nomeadamente em termos de ergonomia, de inocuidade, de conforto e de arejamento. Estas não devem ser empregues fora das aplicações definidas e devem ser armazenadas ao abrigo da luz, do calor e da humidade e à temperatura ambiente. Também não devem estar expostas a produtos químicos, abrasivos ou corrosivos. O seu dimensionamento apenas tem em conta as secções dos diâmetros comerciais dos varões de aço disponíveis no mercado [78].

Acessórios de instalações hidráulicas prediais

As instalações hidráulicas prediais constituem uma mais-valia para todos os cidadãos, a saúde pública, as atividades económicas e o meio ambiente. Estas abastecem água potável a toda a população e realizam a respetiva drenagem dos diferentes esgotos (águas residuais domésticas, industriais e pluviais), a partir da rede pública. Um projeto de instalações hidráulicas é um trabalho complexo e que exige o conhecimento de engenheiros e especialistas, quer para a escolha dos dispositivos, materiais e equipamentos adequados quer para o seu dimensionamento, escolhas que devem ter em conta, preferencialmente, as dimensões económicas e as de qualidade. De uma forma geral, estes projetos integram três tipos de redes: a de distribuição de água, a de drenagem de águas residuais domésticas e a de águas residuais pluviais.

As tubagens que compõem as redes são interligadas por meio de acessórios de união ou de transição, que podem ser de vários materiais, dependendo do fim a que se destinam. Para o estudo atual, foram considerados acessórios de ligação de PVC (Policloreto de Vinila, plástico sintético) ou de PP (Polipropileno), compatíveis com tubagens do mesmo material, que constituem dois exemplos de materiais plásticos que se aplicam nestas instalações e, por isso, se assemelham aos materiais de Impressão 3D apresentados anteriormente, neste capítulo.



Figura 49 - Acessórios de tubagens em PVC [79]

As tubagens e acessórios de PVC e PP destinam-se aos sistemas prediais de distribuição de água fria e quente. Estes devem suportar temperaturas até aos 80°C, mas podem ser dimensionados para suportar temperaturas até aos 100°C. Os acessórios de PVC devem ser unidos às tubagens através do processo de colagem. Já os acessórios de PP ligam-se às mesmas por meio de processos de eletrossoldadura ou mecânicos. As vantagens da utilização de instalações hidráulicas em PVC prendem-se com o seu fácil manuseamento, a sua boa resistência química e à corrosão, a sua baixa condutibilidade térmica e peso e, por último, por ser facilmente reciclável. Por outro lado, apresentam alguns inconvenientes como a baixa resistência aos raios UV e à sensibilidade aos cortes e choques físicos. Aos acessórios de PP acrescentam-se como vantagens a sua boa durabilidade e os baixos custos de manutenção, mas como inconveniente uma maior espessura de paredes e menores pressões de serviço, quando sujeitas a temperaturas mais elevadas [80].

A gama de diâmetros dos tubos e acessórios disponíveis para cada tipo de material estão completamente definidos no mercado, bem como as respetivas pressões de serviço que ambos devem suportar. Os vários tipos de acessórios compreendem tês (simples ou com redução), joelhos, reduções, tampões, juntas cegas, flanges, etc. No entanto, por vezes, surge a necessidade de aplicar acessórios que não são tão comercializados ou que até nem existem no mercado como, por exemplo, tubos angulares com ângulos muito específicos ou acessórios com diâmetros diferentes dos que habitualmente estão disponíveis. Nestes casos, a Impressão 3D pode apresentar-se como uma solução rápida e prática para fabricação de um destes componentes, pois permite a criação de formas únicas e que geralmente são de difícil execução. A encomenda de produtos personalizados comportam muitas vezes custos excessivos que podem aumentar substancialmente o preço de uma obra e, neste caso, a Impressão 3D pode também constituir uma alternativa bastante mais económica [81].

A pré-fabricação representa um dos principais meios de construção industrializada, que tem como foco principal produzir elementos construtivos sem mão-de-obra artesanal, mas com máquinas manobradas por operários especializados, de forma a diminuir o tempo gasto por cada etapa construtiva. Deste modo, é possível reduzir tantos os custos como os prazos de entrega, aumentar a produtividade da execução das tarefas e melhorar a qualidade do produto final. Assim, a industrialização está sobretudo relacionada com conceitos de organização e de produção em série, incluindo a continuidade técnica e de mercado [82].

Para o presente estudo sobre Impressão 3D, foram então considerados elementos construtivos que geralmente são fabricados em massa e fora do local das construções, como caixilharias e proteções de parede (como por exemplo, rodapés, roda-macas e lambris). Dada a dimensão destes elementos, uma

impressora do tipo da disponível não conseguiria imprimir estes produtos como peças finais completas. No entanto é uma excelente ferramenta para desenvolver protótipos que permitam estudar tanto as capacidades da Impressão 3D FDM na conceção de produtos com geometrias intrincadas como na criação de peças inovadoras ou complementares a sistemas pré-fabricados mais complexos.

Caixilharias e caixilhos interiores

Nos últimos anos, com o desenvolvimento tecnológico da arquitetura, tem-se vindo a aplicar com mais frequência zonas envidraçadas nos edifícios, proporcionando-lhes assim uma maior transparência e harmonia com o espaço exterior. Daí terem surgido cada vez mais novas soluções de caixilharias, capazes de realizar esse contacto, de formas diversas e originais. Esta evolução abrange questões estruturais, funcionais e estéticas, sendo já possível recorrer a diferentes materiais para a sua construção, que lhes atribuem propriedades diversificadas e adequadas ao tipo de utilização e ambiente em que se inserem. A aplicação de um determinado género de caixilharia requer um conhecimento aprofundado acerca das suas características e da influência que possa ter na vida quotidiana do respetivo utilizador. Existem imensos tipos de janelas que exigem diferentes formas de caixilharias. São exemplos as janelas fixas, de correr, basculantes, em guilhotina, etc. Dada a quantidade de diferentes caixilharias que atualmente existem, a sua tipificação estrutural torna-se um procedimento complexo, pois cada caso apresenta as suas particularidades.



Figura 50 - Canto de caixilharia com corte térmico [83]

O dimensionamento de caixilharias centra-se principalmente na sua resistência contra a ação do vento, que é definida em função da altura do edifício. Deste modo, para alturas diferentes, as janelas estarão sujeitas a pressões distintas, logo o seu comportamento também será desigual. Se as janelas estiverem expostas a pressões positivas ou pressões negativas, isso também influencia o seu esquema estrutural. As propriedades mais particulares de uma determinada caixilharia são as dimensões e geometria do seu vão, pois formas e tamanhos diferentes resultam em esforços diferenciados nos perfis o que, naturalmente, compromete os elementos resistentes das janelas. Além disto, a forma de abertura de uma janela também influencia o esquema estrutural de uma caixilharia, uma vez que diferentes tipos de abertura requerem diferentes acessórios de fixação e, conseqüentemente, formas diferentes de transmitir as ações aplicadas. Por exemplo, as dobradiças e os pontos de fecho do vão e entre as folhas da janela conduzem os esforços aos vãos e conferem uma maior rigidez à janela. Os postes de caixilharia

podem ser constituídos por um ou dois perfis, sendo que, no segundo caso, se aplica à necessidade de executar cortes térmico no interior das janelas, permitindo assim maior controlo da condução térmica e elétrica da caixilharia, melhorando significativamente o seu desempenho.

Dado que as caixilharias definem a envolvente de um edifício, estas necessitam de cumprir certas exigências requeridas por parte dos utilizadores: adequada resistência ao vento e ao choque de corpos sólidos, resistência mecânica, resistência e reação ao fogo, segurança na utilização, segurança dos ocupantes, permeabilidade ao ar, estanquidade à água, conforto higrotérmico e acústico e renovação do ar interior. Para confirmar a qualidade das caixilharias relativamente às referidas exigências de desempenho, estas devem ser ensaiadas de acordo com a normalização existente. A tabela 9 sintetiza as principais exigências e respetivas normas de ensaio e ainda as classificações associadas [83].

Com a impressora 3D disponível é praticamente impossível criar um modelo de uma caixilharia de uma janela de fachada que cumpra todos os requisitos e exigências de desempenho obrigatórias. Em primeiro lugar, por causa da área de construção da impressora, dado que seria necessário produzir a caixilharia por partes e posteriormente realizar a sua assemblagem, pelo que seria difícil garantir sua a resistência mecânica contra os choques de corpos sólidos e contra o vento, por exemplo. Por outro lado, devido ao facto de a quantidade de tipos de filamentos compatíveis com a impressora 3D ser muito limitada e ainda não ser possível imprimir com Impressoras 3D de baixo custo filamentos de alumínio, madeira, cerâmica ou PVC, que são exemplos de materiais correntemente utilizados no fabrico de caixilharias e cujas propriedades relativas ao desempenho higrotérmico, acústico e de durabilidade são bem conhecidas.



Figura 51 - Caixilho de porta telescópica [84]



Figura 52 - Caixilho de cabine de chuveiro [85]

Por outro lado, no caso de caixilhos interiores de portas corredeiras, telescópicas, portas de compartimentos de chuveiros, etc., muitas das exigências mencionadas deixam de fazer sentido, como a resistência contra o vento e o conforto higrotérmico. Além disso, este género de sistemas possui muitos acessórios que, sobretudo devido ao seu tamanho, podem ser reproduzidos funcionalmente via Impressão 3D, de forma a facilitar a sua reparação, personalização e substituição, possibilitando igualmente a criação de elementos únicos, pouco ou nada disponíveis no mercado. São exemplos desses acessórios, dobradiças, calhas e fechos.

Proteções de parede

Os sistemas de proteção de paredes podem ser compostos por rodapés, roda-cadeiras, roda-macas, esquinas, lambris, entre outros. Estes constituem a primeira linha de defesa das paredes contra impactos em áreas onde existe uma grande densidade populacional, como hospitais, hotéis, escolas, pavilhões desportivos ou de eventos. A sua utilização reduz substancialmente a necessidade de manutenção e as despesas de restauro que possam surgir ao longo do tempo e proporciona um aspeto cuidado e esteticamente agradável aos utilizadores destes espaços. As proteções de parede ou barras antichoque, de uma forma geral, são formados através de perfis de PVC, EPS (poliestireno expandido), cerâmica, madeira ou alumínio, que são fixados à parede com ou sem suportes de afastamento.

Nos casos em que as proteções de parede são destinadas a edifícios públicos como hospitais, indústrias alimentares, lares, escolas ou escritórios, os perfis são normalmente de alumínio com suportes e revestidos com vinil de formulação antibacteriana e isenta de metais pesados. Desta forma, as barras são sanitariamente seguras e tornam-se mais resistentes à abrasão e aos impactos. Por outro lado, no caso dos rodapés, estes além de protegerem as paredes contra choques de objetos, também as protegem contra a humidade, quando ocorrem pequenas inundações ou infiltrações no pavimento. Estes também possuem uma função estética, pois melhoram significativamente o acabamento na junção das paredes e das lajes, que podem apresentar imperfeições na sua execução [87], [88].



Figura 53 - Roda-macas aplicada num hospital [86]



Figura 54 - Exemplos de rodapés com diferentes formas e materiais [87]

A dificuldade de produção destes sistemas de proteção prende-se muitas vezes com a sua colocação e montagem em paredes com formas curvas e orgânicas ou em esquinas formadas por ângulos não correntes. Muitas vezes os perfis são cortados e moldados em obra, pelo que por vezes o fator humano condiciona o seu resultado final. Também neste sentido, a Impressão 3D pode ser uma ótima ferramenta, pois consegue criar formas geométricas livres e com um nível de precisão bastante elevado. Neste caso, com a impressora 3D disponível, é possível criar várias peças até 25 cm de comprimento, de modo a formar as barras antichoque ao longo das paredes dos compartimentos dos edifícios.

4

PROCEDIMENTOS PARA IMPRESSÃO 3D DOS CASOS DE ESTUDO

4.1. PRÉ-PROCESSAMENTO

Como explicado no capítulo anterior, antes de realizar a impressão tridimensional das peças consideradas para o presente estudo, foi necessário realizar dois passos: o primeiro consistiu na aquisição ou criação de modelos CAD 3D e o segundo na divisão desses modelos em camadas, realizando também a respectiva parametrização dos dados para Impressão 3D, guardando-os em *G-code*. Ambos os passos foram executados com recurso aos programas informáticos, também supracitados no capítulo 3: *AutoCAD*, *Revit* e *PrusaSlicer*. As peças escolhidas para impressão consistem em protótipos, pelo que muitas vezes foi necessário adaptar o seu tamanho à área de construção da impressora 3D disponível, tendo estas apenas um papel representativo e demonstrativo das capacidades da mesma.

4.1.1. MODELAÇÃO DE OBJETOS 3D NO *AUTOCAD*

No programa *AutoCAD*, foi possível criarem-se quatro géneros de objetos tridimensionais: estruturas em arame, objetos sólidos, superfícies e modelos em malha. As estruturas em arame representam as geometrias de referência dos modelos e são particularmente relevantes para quando é necessário realizar várias iterações do mesmo projeto. Já a modelação de superfícies ajuda a monitorizar e a controlar superfícies curvas e complexas, pois são mais fáceis de analisar e alterar do que objetos sólidos. A utilização de modelos 3D em malha permite o desenho em forma livre, viabilizando a sua dobra ou suavização. Por último, os objetos sólidos podem combinar perfis básicos em 2D, com recurso a técnicas de modelagem, como a extrusão ou a revolução, adicionando assim aos modelos propriedades de massa e recursos de subtração e corte.

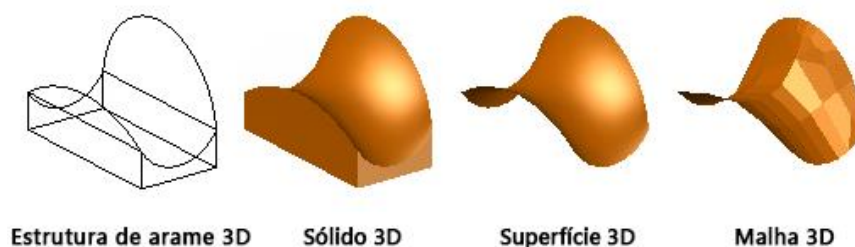


Figura 55 - Tipos de modelos 3D no programa *AutoCAD* [89]

Por outro lado, um modelo 3D pode compreender várias combinações destes modos, podendo cada um deles ser convertido num dos outros, isto é, um objeto sólido pode ser convertido numa malha 3D para realizar eventuais ajustes à malha e, de seguida, a malha pode ser transformada num conjunto de superfícies ou de converte-se num modelo 3D sólido. Para ser possível imprimir em 3D um objeto criado no *AutoCAD*, é obrigatório que o seu resultado final seja na forma sólida [89], tal como aconteceu nas experiências realizadas.

A criação de superfícies e sólidos 3D realiza-se a partir de geometrias em 2D e na utilização de tecnologias de modelação como a extrusão, varredura, elevação e revolução. É importante notar que curvas ou perfis abertos criam superfícies, enquanto as curvas e perfis fechados criam sólidos ou superfícies, conforme a opção “modo” estiver estabelecida para “sólido” ou “superfície”. A técnica varredura desenrola um objeto 2D ao longo de um caminho, a extrusão estende um perfil 2D na direção perpendicular, a revolução desembrulha um objeto 2D em torno de um eixo e a elevação alonga os contornos de uma forma 2D entre um ou mais objetos, abertos ou fechados.

Quando obtidos os modelos sólidos, estes podem ainda ser unidos, convertendo-se vários em apenas um só, subtraídos entre si, de forma a recortar os modelos ou criar vazios no seu interior ou ainda intersetados, criando juntas geométricas entre os objetos[90]. Quando alcançado o resultado pretendido em relação a um objeto 3D com o intuito de ser impresso em 3D, selecionou-se o modelo completo e utilizaram-se as opções de exportação do *AutoCAD* para converter o formato do modelo para um de Fabricação Aditiva, neste caso, para STL.

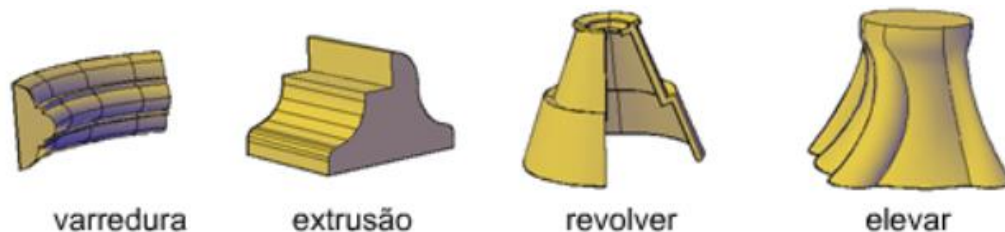


Figura 56 - Técnicas de modelação 3D no programa AutoCAD [90]

4.1.2. MODELAÇÃO DE OBJETOS 3D NO *REVIT*

Como já mencionado, todos os elementos que são adicionados a um projeto no *Revit* são catalogados em famílias, que são uma série de elementos com um conjunto análogo de parâmetros e uma representação geométrica respeitante, possibilitando assim um nível de controlo superior sobre os seus constituintes. Porém, existem dois tipos de famílias: as do sistema e as carregáveis. As primeiras incluem elementos a que o utilizador recorre para conceber componentes básicos de construção, como paredes, pisos e tetos, dentro de um projeto no *Revit*. As segundas são criadas num ficheiro externo diferente, com o formato RFA, para posteriormente serem importadas para um projeto. Outra forma de criar objetos personalizáveis no *Revit* é a elaboração de elementos no local, isto é, dentro do próprio projeto. Contudo, o grau de controlo sobre o objeto passa a ser semelhante ao do *AutoCAD*, não aproveitando assim as vantagens e a acessibilidade rápida do *Revit*. Assim, para empregar famílias carregáveis criadas pelo utilizador ou adquiridas em plataformas digitais que contêm bibliotecas de ficheiros em RFA, bastou importar as mesmas com a ferramenta “carregar família” no interior do projeto e esta ficou automaticamente guardada nesse mesmo trabalho [67].

Para criar um objeto para Impressão 3D neste programa, foi mais prático criá-lo num ficheiro RFA e criar uma família dessa peça, pois as ferramentas disponíveis neste formato são as associadas à modelação 3D, idênticas às descritas no *AutoCAD*. A principal diferença na forma de modelagem dos dois programas está nas restrições que o *Revit* impõe aos modelos. Estas são condições não específicas das vistas e, por isso, funcionam autonomamente, ao contrário das cotas de projeto que também restringem os elementos, mas só em relação à sua posição no projeto. Portanto, a modelação 3D no *Revit* não é de desenho livre, mas é condicionada por uma série de restrições explícitas e implícitas que exigem que cada elemento seja referenciado a partir de um outro. As explícitas são restrições como alinhamentos e cotas bloqueadas que asseguram a manutenção das relações definidas entre os elementos; as implícitas são as que serão sempre mantidas, a não ser que algum problema surja, como por exemplo, quando duas paredes estiverem unidas num canto, estas permanecerão dessa forma, independentemente das alterações realizadas às paredes [91].

Uma excelente vantagem do *Revit* em relação ao *AutoCAD* é a geração automática de diferentes vistas do mesmo modelo, como plantas, cortes, elevações e vistas 3D. Assim, cada folha de desenho, de vistas 2D e 3D e tabelas consistem em exposições da informação relativas ao mesmo conjunto de dados de um modelo subjacente. Por isso, sempre que esse modelo é alterado de alguma forma numa das vistas, o *Revit* propaga essas modificações para todo o projeto, sendo assim apenas preciso alterar uma vez o modelo, ao invés do que acontece no *AutoCAD*, onde é necessário desenhar todas e cada uma das vistas manualmente [92].

Pelo exposto, a criação de uma família de objetos no *Revit* implica, além do fornecimento de informações gráficas, as vistas de plantas, de elevação, de corte e 3D dos seus elementos e quando esta é importada para um projeto, todas estas formas de visualização serão também carregadas. Além disso, é também possível adicionar informação não-gráfica às características de um modelo. Quando este é selecionado, esta informação aparece na paleta de propriedades, onde são distinguidos dois tipos: as propriedades de instância que contêm informações relativas a uma instância específica de um elemento de um modelo (como o diâmetro interno ou o material de um determinado tubo) e as propriedades do tipo de família que se aplicam a todas as instâncias do tipo de família no projeto (como a espessura e o comprimento de uma família de tubos). Famílias parametrizadas são grupos de objetos que têm todas as suas componentes definidas através de instâncias, facilitando assim todo o processo de adaptação ou modificação de um determinado objeto para uma situação particular. Por conseguinte, já não foi necessário modelar uma nova peça, apenas alterar na tabela de propriedades os parâmetros desejados [93].

Originalmente, o *Revit* não está ainda atualizado para converter os seus ficheiros para um formato compatível com a Impressão 3D, mas já é possível descarregar uma extensão para o programa, que faz essa conversão. Contudo, alguns problemas surgiram quando abertos certos ficheiros STL, criados no *Revit*, no programa da laminação utilizado para preparar os modelos 3D para impressão. Graças à interoperabilidade entre os dois programas de modelação descritos, essas dificuldades foram ultrapassadas ao importar os modelos do *Revit* para o *AutoCAD* e, partindo deste último, concretizar então a sua exportação para STL.

4.1.3. NOTAS PARA MODELAÇÃO 3D DIRECIONADA PARA IMPRESSÃO 3D

A modelação digital 3D de objetos a fim de fabricá-los via Impressão 3D apresenta alguns desafios, pois é uma forma de produção bastante diferente das restantes. Por esta razão, cada tecnologia de Impressão 3D exige uma projeção especial dos modelos 3D a imprimir e alguns aspetos foram considerados na fase de criação e de desenho. Por outro lado, visto que a tecnologia de Impressão 3D

disponível é de FDM e, portanto, das mais usadas, existem já modelos pré-concebidos disponibilizados em formatos de Fabricação Aditiva, como por exemplo em STL ou OBJ. Além disso, é concebível exportar estes ficheiros para formatos CAD, tendo sido possível realizar as modificações desejadas, aproveitando modelos já criados para a conceção de peças personalizadas.

Para os modelos criados de raiz, foram tidos em consideração os seguintes aspetos [69]:

- **minimização de estruturas de suporte** – as saliências muito íngremes foram evitadas, procurando sempre o melhor posicionamento dos objetos na plataforma de impressão, de forma a reduzir ao máximo o desperdício de material;
- **espessura mínima dos modelos** – a espessura é limitada pelo diâmetro do bico extrusor, sendo, neste caso, a espessura mínima de 0.45 mm, o que representa a espessura de um perímetro. Por não ser possível imprimir meio perímetro, a largura das espessuras dos contornos das peças tiveram de ser múltiplas de 0.45 mm;
- **divisão do modelo** – para melhores resultados, quer a nível visual ou de propriedades mecânicas, alguns modelos foram divididos em múltiplas partes. Desta forma, foi possível imprimir objetos mais complexos, distribuindo as suas componentes ao longo da plataforma, o que muitas vezes reduz também a quantidade de estruturas de suporte necessárias. Posteriormente as partes foram montadas ou coladas;
- **tolerâncias de encaixe** – em peças impressas por partes, que devam encaixar umas nas outras, foi necessário considerar uma pequena tolerância de ajuste entre as mesmas. Por exemplo, para que as partes ficassem o mais ajustadas umas às outras, dentro do que é possível, as peças com menor secção têm de ser 0.1 mm mais pequenas. Para um encaixe aceitável, esta tolerância deve ser de pelo menos 0.15 mm e, para peças mais soltas, 0.2 mm.

Todos os desenhos técnicos e auxiliares utilizados para a execução dos modelos 3D encontram-se em anexo. Estes foram todos preparados no *Revit* e foi graças à sua capacidade de armazenamento da informação gráfica dos modelos 3D para diferentes vistas que este trabalho se revelou bastante mais rápido.

4.1.4. MODELOS CAD 3D DOS PROTÓTIPOS DOS CASOS DE ESTUDO

Cogumelos De Proteção De Armaduras

Os cogumelos ou cápsulas de proteção foram desenhados no *AutoCAD*, de acordo com os diâmetros comerciais dos varões de aço de betão armado do tipo A500 e A400. Foi também criada uma família parametrizada no *Revit* para os cogumelos, de forma a facilitar a escolha da respetiva dimensão, no momento da sua Impressão 3D, dado que foi criado um cogumelo para cada diâmetro dos varões de aço disponíveis no mercado. Além disso, a altura das cápsulas pode ser modificada sem influenciar a dimensão das aberturas onde encaixam os varões de aço, facilitando assim a sua personalização. Para cada cogumelo foi atribuída uma cor diferente, cada uma delas correspondente a uma nova função de identificação das distintas secções dos varões. Esta ideia surgiu porque os modelos correntes possuem pequenas abas flexíveis no interior do cilindro oco, que ajudam a fixar os varões de aço, com diferentes diâmetros, apenas num cogumelo. Como os cogumelos foram impressos com um único material, pouco flexível, optou-se então por concretizar um cogumelo para cada diâmetro comercial.

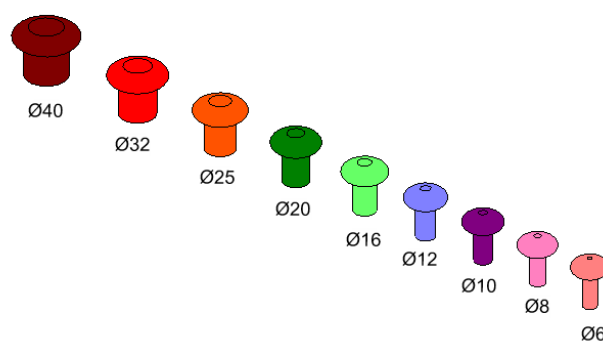


Figura 57 - Modelos CAD 3D de cogumelos de proteção de varões de aço

Espaçadores de cofragens

Existem muitos tipos de espaçadores de cofragens e estes dividem-se em dois grandes grupos: espaçadores para armaduras verticais (para paredes, pilares e lateral de vigas) e espaçadores para armaduras horizontais (para lajes e vigas). Estes últimos apresentam geometrias substancialmente mais intrincadas e, por isso, serão presumivelmente as peças mais difíceis de imprimir tridimensionalmente, razão pela qual foram escolhidas para serem testadas. Além disso, têm como função garantir o correto posicionamento e estabilidade das armaduras horizontais, sustentando-as à altura adequada para o correto recobrimento projetado para a peça de betão armado. Assim, para o presente estudo, optou-se por imprimir dois tipos de espaçadores de armaduras horizontais: espaçador pontual do tipo cavalete (1) e espaçador para cruzamento de varões (2).

Os modelos 3D destes espaçadores foram adquiridos numa biblioteca de ficheiros para Impressão 3D, numa plataforma digital denominada *Thingiverse* [95], [94]. Após a sua aquisição, os ficheiros em STL foram convertidos para CAD e as suas dimensões parametrizadas, para que pudessem ser alteradas, de acordo com os diâmetros comerciais dos varões de aço A400 e A500 e as alturas correspondentes às espessuras de recobrimento mínimas indicadas no Eurocódigo 2, para as classes de exposição ao betão X0, XC1 e XC2 (isto é, para estruturas de betão no interior do edifício), as mais indicadas para o uso de espaçadores à base de plástico.



Figura 58 - Modelos CAD 3D de espaçadores de cofragens para armaduras horizontais

Acessórios de tubagens

Relativamente aos acessórios de tubagens, foram escolhidas peças diferentes para impressão, consoante o desafio que estas apresentavam, como será explicado no próximo capítulo. Enquanto duas das peças foram originalmente modeladas, as restantes foram adquiridas na plataforma *Thingiverse*[97], [96], uma vez que apresentavam particular interesse pela sua forma e nível de detalhe. As duas peças originalmente criadas foram concebidas para serem testadas como peças finais, enquanto as obtidas na biblioteca de modelos STL serviram como protótipos para testar a viabilidade de algumas questões, como a disposição de modelos de tubos na plataforma, ângulo máximo para tubos salientes e angulares sem estruturas de suporte e nível de detalhe possível nas juntas e nas ranhuras dos tubos que perfazem as roscas.

As duas peças que foram modeladas de raiz constituem uma junta de união e uma secção de um tubo reto, que podem ser partes constituintes, por exemplo, de um tubo de queda de águas pluviais, pelo que o tubo pequeno impresso serviu mesmo para simular a junção de um tubo de queda à junta de união. Caso fossem constituintes de um sistema de tubagens sob pressão (no caso das redes de abastecimento de água domésticas) estes necessitariam de ser roscados, de forma a sustentar a pressão interior acumulada na junta. Como nos tubos de queda o escoamento das águas pluviais dá-se por gravidade, as peças podem ser coladas e seladas com um anel de borracha, colocado dentro na saliência da junta.

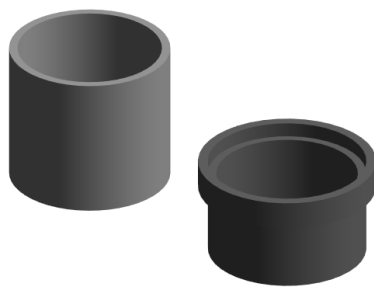


Figura 60 - Modelos CAD do tubo reto e da junta de união



Figura 59- Modelos CAD 3D dos acessórios de instalações hidráulicas adquiridas

Canto de caixilho e fecho de correr

De forma a simular as geometrias intrincadas dos postes de caixilharias, foi adquirida uma família *Revit* na plataforma digital *Bimstore* [98] de um caixilho de chuveiro. Desta forma foi possível testar o nível de precisão da impressora 3D em peças com geometrias complexas e que incluíam secções de espessura muito reduzida. O protótipo era constituído por pequenas secções do poste e da parte inferior do caixilho e uma pequena calha, que foram posteriormente coladas, constituindo assim um canto do caixilho de chuveiro.

Adicionalmente, foi igualmente adquirido no local *Thingiverse*[99] um fecho simples de uma porta, constituído por 4 componentes, encaixadas e coladas, para mais tarde serem aparafusadas a uma parede e a uma porta. Esta última peça tem particular interesse pela possibilidade de cumprir a necessidade de alcançar o ajuste adequado entre as peças, dado que estas devem encaixar com uma ligeira folga para permitir o seu movimento. Deste modo, a peça assume duas posições distintas: de abertura e de fecho.

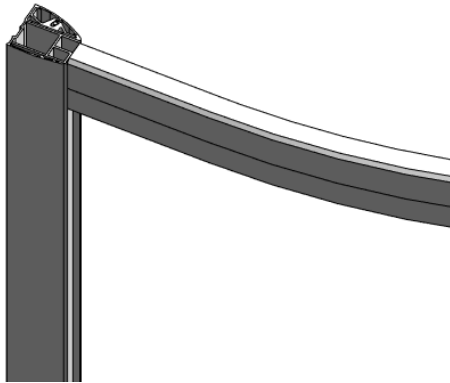


Figura 61 - Modelo CAD 3D do canto do caixilho de chuveiro

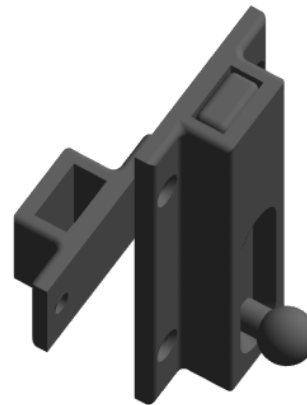


Figura 62 - Modelo CAD 3D de fecho de correr

Cantos de rodapés

Por último, foram modelados dois cantos de rodapés no *AutoCAD*: um a 90° e um segundo a 137°, ambos com uma secção arredondada. Assim, o objetivo foi verificar a capacidade da impressora 3D em realizar corretamente os pormenores das juntas com ângulos intrincados e não muito correntes e averiguar se tal não confere menos resistência à peça.

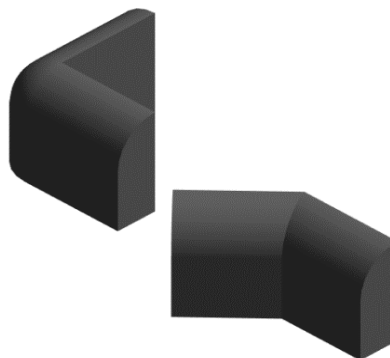


Figura 63 - Modelos CAD 3D de cantos de rodapés

4.1.5. DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS DE IMPRESSÃO

Após terminar a modelação tridimensional das peças anteriormente referidas, os seus modelos foram exportados a partir do *AutoCAD* para o formato STL e, posteriormente, importados para o programa de laminação *PrusaSlicer*. Neste último, foram testadas diferentes configurações de impressão para cada peça, no modo mais simples que o programa oferece, dado que este já vem preparado com alguns perfis de impressão adequadamente parametrizados, consoante o tipo de filamento e impressora a utilizar. Por outro lado, algumas definições foram modificadas de acordo com a forma e tamanho do modelo, de modo a obter o melhor resultado e garantindo o menor desperdício de material e de tempo.

Ambos os filamentos utilizados para a impressão 3D das peças em estudo são do mesmo fabricante que a impressora 3D disponível, constituindo a melhor solução para as condições disponíveis.

Isto porque estes filamentos foram concebidos para funcionar com a impressora empregue e o programa da laminação contém perfis de impressão otimizados para os materiais da própria empresa.

Para a grande maioria das peças, foi utilizado o filamento de PLA cinzento, dado que se tratavam de peças de prototipagem, dado que este é o mais barato e mais ambientalmente seguro por ser biodegradável. Contudo, foram também testadas algumas peças com um material que seria vantajoso para a sua aplicação, o ABS, que apesar de ser mais difícil de imprimir, é muito mais resistente do que o PLA e mais fácil de pós-processar.

4.1.5.1. Configurações Antes da Laminação dos Modelos

O primeiro passo realizado, quando aberto o programa de laminação, foi ajustar as temperaturas de impressão e da plataforma de aquecimento, de acordo com as instruções fornecidas pelos fabricantes dos filamentos, e definir o diâmetro do bico extrusor que foi utilizado. De seguida, os modelos a imprimir foram importados para o *PrusaSlicer* e organizados na plataforma de impressão. Nesta altura, foram pensadas quais as posições ótimas dos modelos na plataforma e foram realizados ajustes à sua geometria, sempre que necessário.

Por fim, foram escolhidas as definições relativas à velocidade de impressão, à altura das camadas, ao material, à necessidade de estruturas de suporte, à densidade de preenchimento e à opção de utilização de uma borda. A Figura 64 é uma fotografia legendada da janela do programa da laminação, antes da divisão do modelo em camadas, e mostra como estão organizadas as ferramentas do programa.

Leitura da figura 11:

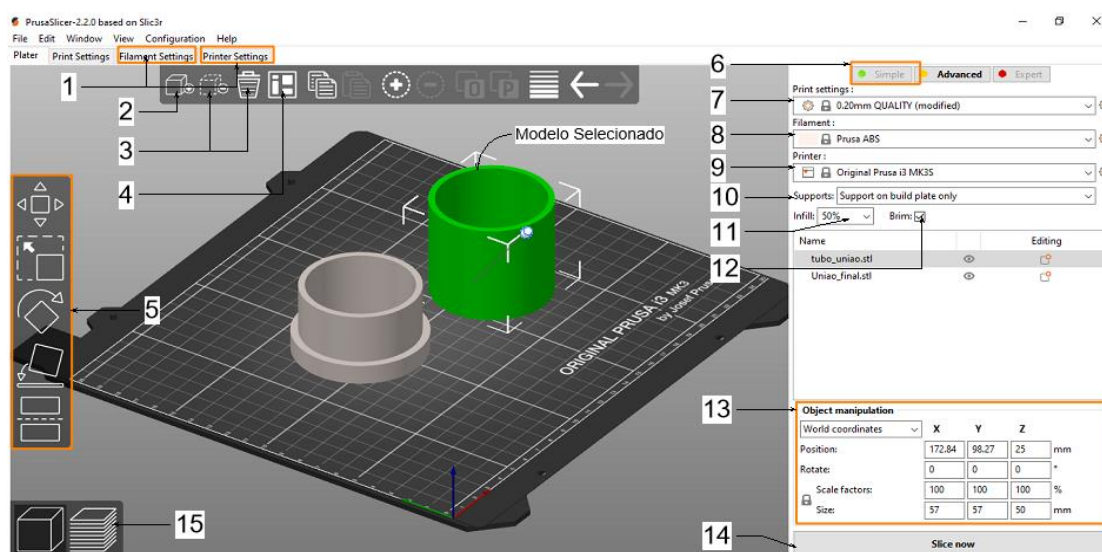


Figura 64 - Legenda das configurações realizadas nas peças no *PrusaSlicer*

1. Configurações relativas ao filamento e à impressora utilizada.
2. Botão para importar modelo no formato STL para programa.
3. Botões para eliminar um ou todos os modelos já adicionados.
4. Botão para organizar os modelos na plataforma de impressão.
5. Ferramentas para mover, dimensionar, rodar, dispor sob uma face e dividir em partes o modelo selecionado.

6. Opções do modo das definições: simples, avançado e profissional.
7. Definição da altura das camadas e da velocidade de impressão.
8. Definição do material do filamento a utilizar.
9. Definição do modelo da impressora.
10. Opções para as estruturas de suporte.
11. Definição da densidade do preenchimento (*Infill*).
12. Opção para a utilização de uma borda (*Brim*).
13. Definições para manipulação geométrica do modelo selecionado: posição na plataforma e dimensões do modelo selecionado.
14. Botão para realizar a divisão dos modelos em camadas, segundo as definições estabelecidas.
15. Botão para alterar a visualização dos modelos: antes e após a sua laminação.

Na definição da altura das camadas e da velocidade de impressão, pôde optar-se por modos de velocidades distintos para cada uma das alturas das camadas que se encontram já pré-definidas no programa. Estas opções permitiram ajustar tanto a qualidade de impressão do modelo como a respetiva duração. Ao escolher uma altura para as camadas maiores, conseguiu reduzir-se substancialmente o tempo de impressão. No entanto, estas revelaram-se substancialmente mais visíveis, enquanto o oposto conferiu um melhor resultado em termos de estética e nível de detalhe, ainda que a duração da impressão tenha duplicado ou triplicado. Assim, para a menor altura possível das camadas (0.10 mm) o modo de velocidade é de “detalhe”; para a maior (0.30 mm) o modo é de “rascunho”; e para as alturas mais recorrentes (0.15 mm e 0.20 mm) existem dois modos distintos: o de qualidade que, imprimindo mais lentamente, proporcionou um melhor acabamento às superfícies do modelo; e o de rapidez que permitiu à impressora realizar os perímetros e o preenchimento mais rapidamente, sem sacrificar em demasia o aspeto das superfícies.

No caso das opções para as estruturas de suporte, foram observadas quatro alternativas possíveis: a primeira é “nenhumas”, o que basicamente desliga esta opção. A segunda é “apenas na plataforma de construção”, o que significa que as únicas estruturas de suporte que serão geradas são as que se apoiam na plataforma. Uma outra opção é “apenas as que são impostas”, o que permite ao utilizador ignorar as decisões do algoritmo do *PrusaSlicer*, relativamente à localização das estruturas de suporte, e definir ele mesmo as áreas específicas que pretende trabalhar. Por último, existe a opção “em todo o lado” que, para os utilizadores mais inexperientes e para peças mais pormenorizadas e orgânicas, deve ser selecionada. Isto porque o programa consegue facilmente detetar as áreas mais problemáticas do modelo e definir quais as pontes e saliências que não necessitam obrigatoriamente de suporte, funcionando sempre bem.

No canto superior esquerdo encontram-se ainda todas as definições avançadas relativas à impressão (camadas, perímetros, saias, jangadas, bordas, material de suporte, etc.), ao filamento (temperaturas de impressão e da plataforma, quantidades, custos) e à impressora 3D disponível (diâmetro do bico extrusor, retrações). Estas encontravam-se de acordo com os perfis pré-definidos dos materiais no programa, sendo que apenas foi preciso alterar as temperaturas de impressão e da plataforma, o preço dos filamentos e o diâmetro do bico extrusor [69].

4.1.5.2. Configurações dos Filamentos

Os dados inseridos no *PrusaSlicer* referentes às características e às temperaturas de utilização dos filamentos que foram usados nos diversos testes são os que constam na tabela 10 e foram retirados das respetivas fichas técnicas fornecidas pelo fabricante. Momentos antes das impressões das peças em

estudo, foram também introduzidas as temperaturas de utilização na própria impressora 3D, de forma a esta pré-aquecer já com os valores corretos.

Características dos Filamentos					Temperaturas de Utilização Recomendadas	
Material	Cor	Diâmetro	Densidade	Preço/Kg (s/IVA)	Temperatura Bico Extrusor	Temperatura Plataforma
PLA	Cinzentos	1.75 ± 0,05 mm	1.27 g/cm³	17,35 €	215 °C	60 °C
ABS	Branco	1.75 ± 0,05 mm	1.08 g/cm³	19,00 €	255 °C	110 °C

Tabela 9 - Configurações dos filamentos utilizados [63]

4.1.5.3. Procedimento Após Laminação Dos Modelos

Depois de carregar no botão para concretizar a laminação dos modelos, foi possível obter a visualização do modelo fatiado e as características específicas legendadas de cada camada, pois estas podem pertencer, por exemplo, a estruturas de suporte (camadas a verde), a perímetros (camadas a laranja), a pontes e a saliências ou camadas sólidas (camadas a vermelho). Além disso, o programa fornece ainda informação das quantidades de material utilizado na respetiva impressão e estima o preço de cada impressão, consoante o custo por quilograma de filamento definido, e o tempo de impressão, em modo normal ou em modo silencioso[69]. A Figura 65 mostra como os modelos são representados após a sua laminação e todos os dados relevantes inerentes à sua impressão 3D. Quando obtido o ficheiro do modelo fatiado em formato *G-code*, que contém todas as instruções inerentes à impressão do modelo, este pôde finalmente ser guardado num cartão de memória, para posteriormente ser inserido na impressora 3D.

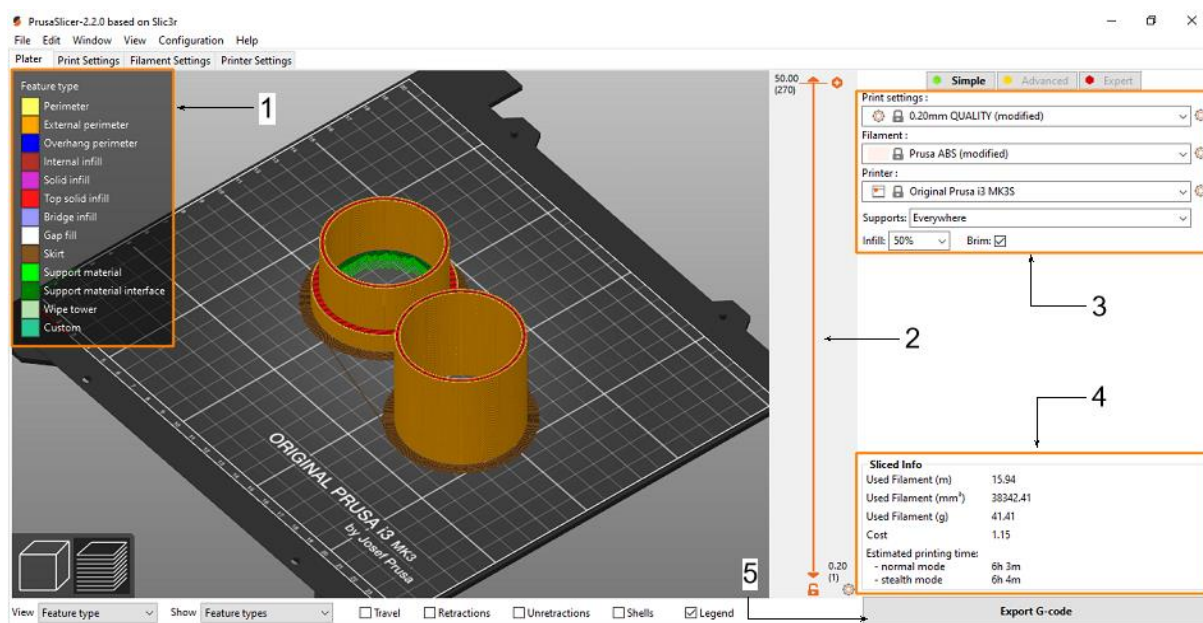


Figura 65 – Legenda da janela de visualização do modelo fatiado e informações geradas no *PrusaSlicer*

Leitura da figura 12:

1. Legenda das características das camadas identificadas pela sua cor.
2. Ferramenta para visualização específica de cada camada, de acordo com altura do modelo.
3. Configurações pré estabelecidas antes da laminação do modelo em camadas.
4. Informação gerada acerca das quantidades de filamento utilizado (em metros, volume e peso), custo e duração da impressão.
5. Botão para gerar o código G-code do modelo pronto para imprimir.

Todas as configurações definidas no *PrusaSlicer* para cada um dos modelos das peças produzidas serão apresentadas no próximo capítulo, bem como toda a informação gerada no mesmo programa sobre cada uma das impressões 3D concretizadas [69].

4.2. IMPRESSÃO 3D DOS PROTÓTIPOS DOS CASOS DE ESTUDO

Antes de prosseguir com a Impressão 3D das peças testadas, foi necessário realizar alguns ajustes na própria impressora, de forma a assegurar a estabilidade de toda a estrutura e das suas componentes, garantindo assim o seu correto funcionamento. Este trabalho deve ser sobretudo realizado após a primeira montagem completa da impressora 3D ou na eventualidade de esta ser transportada para um local diferente, pois tal pode causar ligeiras alterações na sua geometria e, por isso, desnivelá-la.

4.2.1. CALIBRAÇÕES NA IMPRESSORA 3D

Dado que a impressora 3D disponível para o presente estudo tinha sido recentemente transportada de um outro local e ainda não tinha sido novamente utilizada, foi então imprescindível concretizar alguns passos para que as peças fossem impressas corretamente. Em primeiro lugar, foi realizada a calibração do eixo Z, responsável pelo movimento vertical do eixo do bico extrusor. Esta calibração, praticada completamente pela impressora 3D, consiste no armazenamento das alturas de nove pontos, da plataforma ao bico, em memória não volátil. A impressora 3D irá recorrer a esses dados sempre que concretizar o nivelamento da plataforma de construção, o que acontece sempre no início de qualquer nova impressão. Caso os dados armazenados pela calibração do eixo do Z não correspondam aos valores medidos pelo nivelamento da plataforma, surgirá a notificação de erro no ecrã da impressora 3D e a nova impressão será cancelada. Logo, a realização da “Calibração Z” foi um bom indicador do estado de funcionamento do equipamento disponível. Este procedimento deve ser efetuado com a placa de aço removível por cima da plataforma de aquecimento e o bico extrusor deve estar adequadamente limpo para a medição dos pontos ser concretizada corretamente [69].

Outra boa prática essencial para o sucesso de uma nova impressão é designada por “calibração da primeira camada” e consiste em aferir a distância ótima entre a ponta do bico extrusor e o sensor de autonivelamento por indução, situado próximo do bico. Contudo, antes da ativação desta calibração na impressora 3D, é necessário que a placa de aço removível esteja colocada na plataforma de aquecimento e que esteja adequadamente limpa. Para isso foi utilizado álcool etílico e um pano, com a plataforma ainda fria. De seguida, a plataforma e o bico foram pré-aquecidos às temperaturas específicas para esse filamento. A impressora começou a puxar o filamento, expulsando resíduos do material da impressão anterior, até começar a extrair o filamento de material ou cor corretos. Este passo demorou alguns minutos e, por vezes, foram necessárias várias tentativas. Quando o filamento correto começou a sair, o carregamento do filamento foi nesse instante interrompido, tal como é devido.

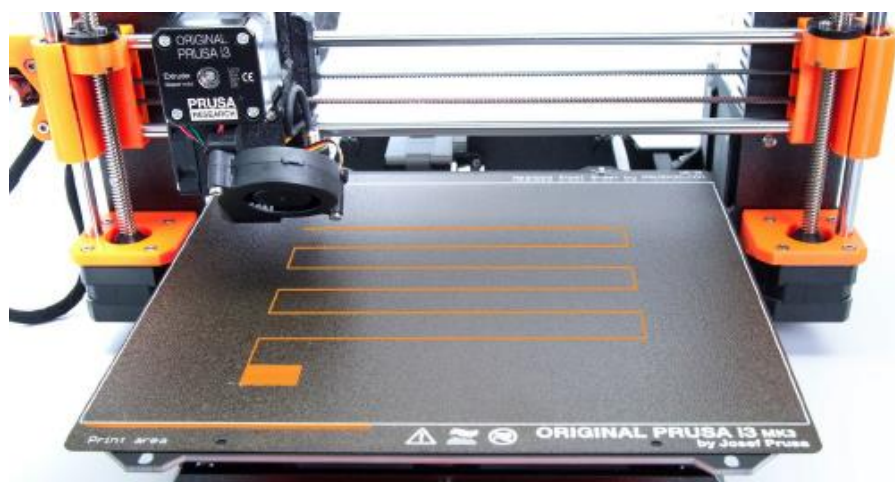


Figura 66 - Calibração da primeira camada na impressora 3D [69]

Terminada a preparação da calibração da primeira camada, pôde finalmente ativar-se esta função na própria impressora. Quando iniciada, a impressora sonda a plataforma de construção e seguidamente imprime, num movimento tipo “zig-zag”, uma linha contínua. Durante este procedimento, foi observada a espessura da linha enquanto estava a ser impressa e, ao mesmo tempo, ajustada no controlador da impressora a altura do bico extrusor, subindo-o ou descendo-o até se ter obtido uma espessura nem muito alta, nem demasiado baixa. Embora pareça algo subjetivo, o fabricante da impressora 3D disponível fornece uma imagem indicativa do aspeto que a camada deve apresentar (como se pode observar na Figura 67). Foi igualmente necessário garantir que o bico não tocasse em qualquer momento na plataforma de construção, pois poderia danificá-la. O objetivo foi encontrar a posição ideal do bico, para que a linha impressa deixasse de descolar da plataforma e tivesse um aspeto sólido mas um pouco comprimido [69].

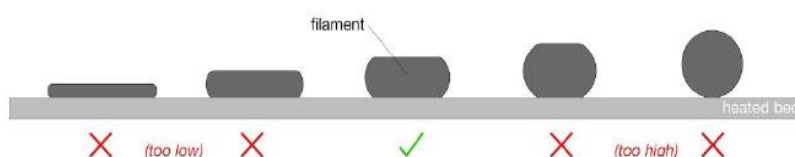


Figura 67 - Forma aconselhada para a espessura da primeira camada pelo fabricante da impressora [69]

Enquanto esta calibração não ficou concluída, foi muito difícil começar a imprimir os modelos, dado que começaram a surgir de imediato irregularidades no início da sua impressão, como as camadas descolarem-se da plataforma ou o bico puxar camadas já depositadas para cima. Caso estas anomalias continuassem a acontecer, provavelmente alguma outra coisa teria de ser ajustada, como o nivelamento da plataforma ou a altura do sensor de autonivelamento, entre outras possíveis. No entanto, em caso de dúvida, a impressora inclui uma opção que permite realizar uma avaliação geral do seu estado e indicar qual o seu problema. Como os problemas pararam no final desta calibração, este foi, portanto, o procedimento adotado [69].

4.2.2. PROCESSAMENTO PARA IMPRESSÃO 3D

. No final de todas as calibrações apontadas e da revisão dos modelos 3D fatiados, foi então possível começar a imprimir as peças com sucesso. O controlo do ecrã LCD desta impressora é feito apenas com o botão de controlo (*control knob*), que além de confirmar uma seleção, é rotativo, e um botão de reiniciar (*reset button*) que termina o processamento da impressão, caso a impressora apresente um comportamento anormal ou ocorram irregularidades durante a impressão que devem ser averiguadas. Para isso apenas foi necessário colocar o cartão de memória onde as instruções para impressão dos modelos em *G-code* foram armazenadas e acionar a opção de “imprimir, a partir de cartão SD” no menu principal da impressora. No ecrã da impressora apareceram várias informações sobre as condições de funcionamento, como as temperaturas da plataforma de aquecimento, do bico extrusor, altura do bico, entre outras. Como se deve garantir, antes do início da impressão, que estes alcancem as temperaturas desejadas para o filamento inserido, o que pode demorar alguns minutos, foi prático aquecê-los previamente.



Figura 68 – Ecrã LCD de controlo da impressora 3D [69]

Terminada a impressão, esperou-se que tanto a plataforma como o bico arrefecessem até à temperatura ambiente para remover a peça da impressora 3D, caso contrário, a sua remoção seria mais complicada e poderia provocar-lhe estragos. Por outro lado, graças ao facto de a placa de aço removível ser flexível, foi bastante simples descolar o objeto, bastando, para o efeito, dobrá-la ligeiramente. Em peças mais pequenas ou impressas com materiais com uma elevada temperatura de fusão, como o ABS, que por isso tendem a ficar mais presas, pôde utilizar-se uma espátula ou um palito para as separar, sem lhes provocar danos substanciais [69].



Figura 69 - Forma correta de remover as peças impressas da placa de aço removível [69]

5

TESTES E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

5.1. TESTES DE IMPRESSÃO 3D DOS MODELOS DOS CASOS DE ESTUDO

De seguida, serão apresentados os testes executados aos modelos CAD 3D dos protótipos dos casos de estudo, com a impressora 3D disponível. Estes foram concretizados de acordo com os procedimentos descritos anteriormente, contudo nem sempre o processo foi tão linear, pois por vezes foram necessárias algumas tentativas até ter sido possível obter o resultado pretendido. Embora este processo se tenha mostrado bastante iterativo, revelou-se igualmente bastante rápido e, por isso, as várias iterações não causaram qualquer constrangimento, mas sim uma mais-valia para a contínua melhoria dos produtos e a aperfeiçoamento das técnicas de Impressão 3D.

5.1.1. ACESSÓRIOS DE COFRAGENS

Cogumelos de Proteção

A primeira Impressão 3D realizada foi então um cogumelo de proteção em PLA, com diâmetro interior de 16 milímetros. Este primeiro teste inicial não foi bem-sucedido, dado à forma como primeiramente foi modelado no *Revit* e devido à escolha da sua disposição na plataforma de construção. O erro na modelação 3D deveu-se à técnica de desenho do modelo: uma cúpula fechada na sua base, apoiada num cilindro oco.

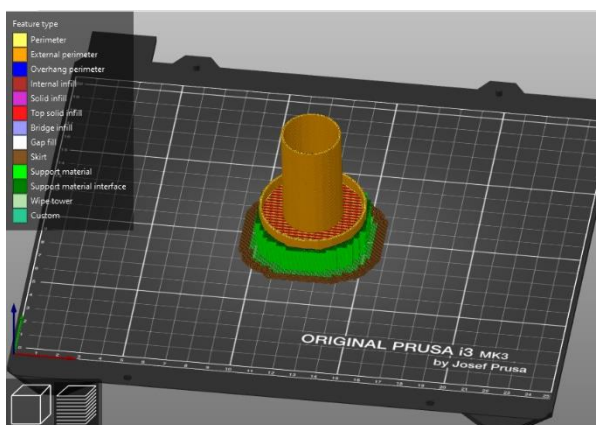


Figura 70 – Modelo laminado do cogumelo no *PrusaSlicer* disposto sob a sua parte superior



Figura 71 – Resultado da primeira Impressão 3D do cogumelo, com muitas irregularidades

Para a modelação da cúpula, foi utilizada uma família *Revit* da mesma, que já se encontrava na biblioteca de famílias do próprio programa, e a sua curvatura foi ajustada de forma a corresponder à peça em questão. Para o cilindro oco foi utilizada a técnica de extrusão de formas 2D, neste caso, de dois círculos. Depois, apenas foi necessário subtrair o cilindro menor ao cilindro maior, para criar o vazio no seu interior, com o diâmetro comercial escolhido. Relativamente à sua primeira disposição na plataforma, esta foi pensada de maneira a minimizar as estruturas de suporte, tendo sido o cogumelo assentado sob a cúpula, que constituía a sua cabeça de proteção. Esta configuração resultou em irregularidades na superfície onde o cogumelo foi apoiado na plataforma e em superfícies facetadas em vez de arredondadas, tanto no cilindro oco como na cúpula.

Já para a segunda tentativa, o cogumelo foi projetado de maneira diferente, com uma outra técnica de modelação que se mostrou bastante mais eficaz, pois eliminou os problemas das superfícies facetadas. Assim, foi desenhado um perfil em 2D da forma do cogumelo e foi utilizada a técnica de revolução segundo o seu eixo vertical. Para criar o buraco no seu interior, foram utilizadas as mesmas técnicas de extrusão de um círculo com o diâmetro pretendido e a sua posterior subtração ao modelo gerado a partir da revolução. Desta forma, o sólido construído a partir da revolução passou a ter as suas superfícies notoriamente mais curvas e arredondadas.

Além disso, para evitar que as estruturas de suporte criassem defeitos na cabeça do cogumelo, este foi disposto na plataforma sob a base do cilindro oco. Apesar desta forma necessitar de mais estruturas de suporte, revelou-se mais eficiente pois não prejudicou significativamente as superfícies em contacto com as mesmas, tendo estas sido facilmente reparadas. No interior do cilindro oco, não foi criado qualquer suporte por parte do programa de laminação e esta foi uma decisão bem estabelecida, pois a Impressora 3D realizou impecavelmente a ponte na secção superior do cilindro, onde se apoia a cabeça do cogumelo.

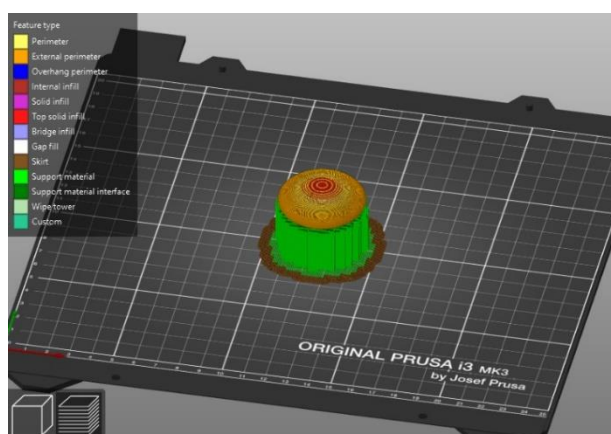


Figura 72 – Modelo laminado do cogumelo no *PrusaSlicer* disposto sob a sua base



Figura 73 - Resultado da segunda Impressão 3D do cogumelo

Todos os dados inseridos no *PrusaSlicer* relativos à Impressão 3D dos dois cogumelos foram identicamente definidos, apenas foi corrigida a altura do cogumelo do primeiro teste (redução de 30%), para que ambos fossem concebidos com as mesmas dimensões. Além das melhorias observadas no segundo teste, relativamente à aparência expectada para peça e às irregularidades provocadas pelas estruturas de suporte, este também se mostrou mais eficiente em termos de quantidade de filamento utilizado, de custos e de tempo despendido na sua produção.

Configurações no <i>PrusaSlicer</i>	Teste 1	Teste 2
Filamento	PLA	PLA
Altura das camadas	0.2 mm	0.2 mm
Modo de velocidade	Qualidade	Qualidade
Suportes	Sim	Sim
Borda	Sim	Sim
Densidade de preenchimento	15%	15%
Escala do eixo Z	70%	100%
Informação gerada no <i>PrusaSlicer</i>	Teste 1	Teste 2
Comprimento de filamento usado	6.11 m	4.43 m
Volume de filamento usado	14701 mm ³	10653 mm ³
Massa de filamento usado	18.67 g	13.53 g
Custo estimado do objeto	0.47 €	0.34 €
Tempo de impressão	2h:13m	1h:49m

Tabela 10 – Informações sobre as configurações realizadas para os cogumelos de proteção e respetiva Impressão 3D

Espaçadores de cofragens

Como explicado no capítulo anterior, os modelos dos espaçadores de cofragens foram adquiridos e não modelados de raiz. Os ficheiros obtidos estavam em formato STL, pelo que foi estudada uma forma de exportar os ficheiros para um formato CAD, tentando assim realizar eventuais alterações aos modelos, como a sua altura ou largura, e parametrizá-las no *Revit*. A exportação dos modelos em STL foi realizada numa plataforma digital designada “*CADforum*” que, basicamente, transforma a informação contida no ficheiro STL numa geometria CAD com o formato DXF (*Drawing Interchange Format*) que significa “formato de troca de desenho”. Este formato foi desenvolvido pela *Autodesk* para permitir a interoperabilidade de dados entre o *AutoCAD* e outros programas de desenho 2D e 3D. Assim, convertidos os ficheiros STL para DXF, estes foram abertos no *AutoCAD* e guardados com o formato próprio deste programa. A partir daqui, foi possível alterar algumas dimensões dos desenhos dos espaçadores e ajustá-los para que apoiassem varões de 6 mm e com as alturas de recobrimento desejadas.



Figura 74 - Resultado da Impressão 3D do espaçador 1 (cavelete)



Figura 75 - Resultado da Impressão 3D do espaçador 2 (cruzamento)

Ambos os modelos foram impressos em PLA sem problemas aparentes, apesar de as suas geometrias complexas terem necessitado de bastantes estruturas de suporte, mesmo na posição mais otimizada para o efeito. Contudo, estas foram retiradas facilmente e não provocaram lesões significativas nas peças, pois a estética não é muito pertinente neste caso, dado que o suposto é que estas fiquem dentro do betão, após a sua utilização. Por esta razão, não foi utilizada uma borda para estes dois testes e ambos foram impressos no modo de velocidade, em vez de qualidade, para observar se esta opção provocaria resultados inesperados e substanciais nas peças, o que não aconteceu.

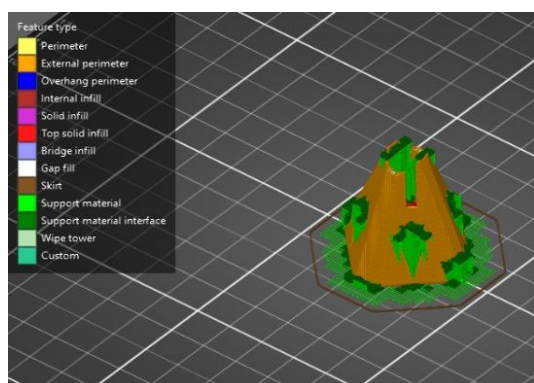


Figura 76 - Visualização do modelo do espaçador 1 laminado no *PrusaSlicer*

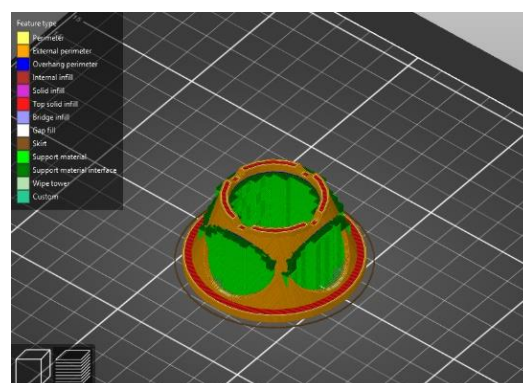


Figura 77 - Visualização do modelo do espaçador 2 laminado no *PrusaSlicer*

A produção dos dois espaçadores demorou aproximadamente o mesmo tempo para cada um. Contudo, o espaçador 1 gastou bastante menos filamento do que o espaçador 2, o que resultou numa poupança de 11 cêntimos, embora o segundo seja o espaçador que garante uma maior espessura de recobrimento (30 mm).

Configurações no <i>PrusaSlicer</i>	Espaçador 1	Espaçador 2
Filamento	PLA	PLA
Altura das camadas	0.2 mm	0.2 mm
Modo de velocidade	Velocidade	Velocidade
Suportes	Sim	Sim
Borda	Não	Não
Densidade de preenchimento	20%	20%
Escala do eixo Z	100%	100%
Informação gerada no <i>PrusaSlicer</i>	Espaçador 1	Espaçador 2
Comprimento de filamento usado	2.31 m	3.81 m
Volume de filamento usado	5564 mm ³	9152 mm ³
Massa de filamento usado	6,90 g	11.35 g
Custo estimado do objeto	0.17 €	0.28 €
Tempo de impressão	1h:40m	1h:36m

Tabela 11 - Informações sobre as configurações realizadas para os espaçadores e respetiva Impressão 3D

5.1.2. ACESSÓRIOS DE TUBAGENS

Foram igualmente impressos em 3D alguns protótipos de acessórios de tubagens em PLA que serviram para testar os limites da impressora 3D relativamente à concretização de peças com detalhes importantes, como é o caso das que possuem ligações roscadas em conjunto com as estruturas de suporte que este tipo de peças exige. Para começar, foi escolhida uma forma simples de uma curva a 45° com o interior liso, definida para ser impressa longitudinalmente sob a plataforma de construção. Contudo, esta configuração gerou muitas irregularidades nas superfícies, pois a parte inferior ficou amolgada devido às estruturas de suporte, assim como no seu interior, em que o acesso aos suportes foi bastante complicado e, por isso, a peça não ficou bem tratada, como se pode ver na figura 50.

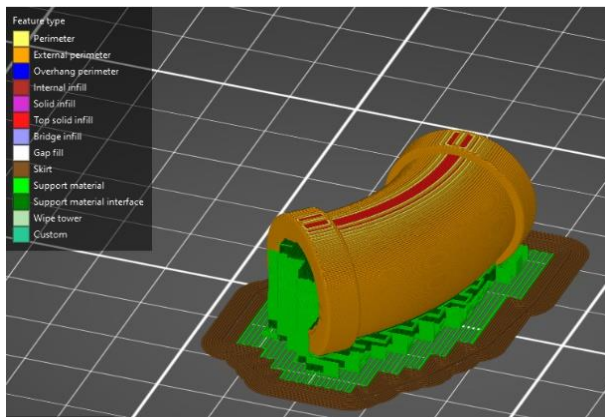


Figura 78 - Visualização do modelo roscado da curva a 45° laminado no *PrusaSlicer*



Figura 79 - Resultado da Impressão 3D da curva a 45°, com muitas irregularidades

De seguida, foram impressos 2 acessórios diferentes, para estudar melhor quais as posições mais favoráveis para a sua produção. Como se tratava de peças experimentais, estas foram configuradas para serem impressas em modo rascunho, isto é, com a altura máxima possível das camadas (0.3 mm), para que todo o processo fosse acelerado. Os modelos foram igualmente adquiridos, tendo sido apenas testados os parâmetros de preparação dos mesmos e as respetivas impressões 3D. A primeira peça foi um tê com uma derivação a 45° e com saídas roscadas que, ao contrário do primeiro acessório hidráulico testado, foi definido para ser impresso verticalmente.

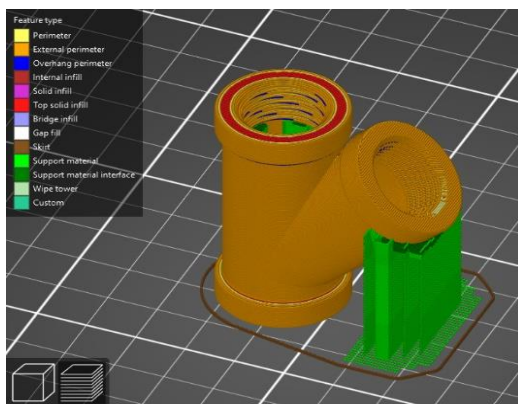


Figura 80 - Visualização do modelo do tê a 45° laminado no *PrusaSlicer*



Figura 81 - Resultado da Impressão 3D do tê a 45°

Como esperado, a qualidade da peça não foi a melhor, devido às configurações pré-estabelecidas, o que originou que os detalhes das mesmas ficassem demasiado imperfeitos. Porém, a sua disposição na plataforma correu bem, pois assim não necessitou de tantos suportes como a primeira e percebeu-se que a impressora 3D disponível consegue suportar um ângulo de 45° na concretização de saliências, sem recorrer a estruturas de suporte, à exceção da secção da saída que aumenta de diâmetro.

A segunda peça ensaiada foi o tê a 90° de dois planos e não roscado e que foi disposto na plataforma assente na sua base horizontal. Os detalhes das ligações entre as três saídas ficaram bastante satisfatórios, mas a parte inferior da peça apresentou os mesmos problemas que a curva a 45°, muito provavelmente devido às estruturas de suporte. No entanto, esta foi a posição que mais as minimizava. Assim, é possível que este problema tivesse sido acautelado com a utilização de uma borda mais espessa, ou seja, uma jangada, que pode ser definida nas configurações avançadas no programa de laminação utilizado.

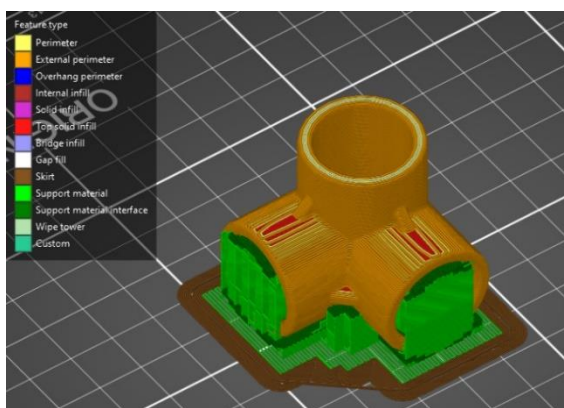


Figura 82 - Visualização do modelo do tê a 90° laminado no *PrusaSlicer*



Figura 83 - Resultado da Impressão 3D do tê a 90°

A terceira peça de prototipagem foi uma repetição da curva a 45°, mas, desta vez, com as saídas roscadas e dispostas verticalmente na plataforma e já não longitudinalmente. Esta configuração minimizou sem qualquer dúvida a utilização de estruturas de suporte na peça e, como aconteceu com o tê a 45°, não foi necessário qualquer suporte na secção inclinada da curva, até à altura de mudança de diâmetro nessa secção. A altura definida para as camadas foi de 0.2 mm, com velocidade no modo “qualidade”, o que fez com que o acabamento das superfícies tenha melhorado significativamente, assim como os pormenores das roscas.

As peças de teste rápido foram concebidas para ter aproximadamente as mesmas dimensões e, por essa razão, a dimensão do modelo do tê a 45° adquirido foi reduzido para 80% do seu tamanho original, no programa de laminação. Ainda assim, a partir da tabela que se segue, percebe-se uma ligeira diferença na quantidade de material gasto nas impressões de ambos os acessórios em tê, sendo que para o de 90° foram despendidas mais 15 gramas do que para o de 45°, o que representa um aumento de cerca de 25 cêntimos por peça e em mais meia hora de produção. Apesar das suas formas geométricas diferentes, que podem gerar, efetivamente, ligeiras disparidades nos resultados, neste caso a diferença abrupta prende-se com a quantidade de estruturas de suporte que cada peça necessitou, sendo que para o tê a 45°, graças à sua disposição otimizada na plataforma, foram muito poucas.

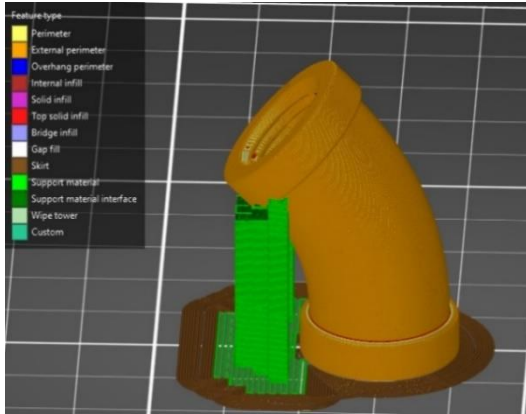


Figura 84 - Visualização do modelo da curva a 45° roscada laminada no *PrusaSlicer*



Figura 85 - Resultado da Impressão 3D da curva a 45° roscada

Configurações no <i>PrusaSlicer</i>	Tê a 45°	Tê a 90°	Curva 45° Simples	Curva 45° Roscada
Filamento	PLA	PLA	PLA	PLA
Altura das camadas	0.3 mm	0.3 mm	0.2 mm	0.2 mm
Modo de velocidade	Rascunho	Rascunho	Velocidade	Qualidade
Suportes	Sim	Sim	Sim	Sim
Borda	Não	Não	Não	Não
Densidade de preenchimento	15%	15%	20%	20%
Escala	80%	100%	100%	100%
Informação gerada no <i>PrusaSlicer</i>	Tê a 45°	Tê a 90°	Curva 45° Simples	Curva 45° Roscada
Comprimento de filamento usado	3.54 m	3.69 m	3.0 m	2.47 m
Volume de filamento usado	8513 mm ³	9152 mm ³	7210 mm ³	5929 mm ³
Massa de filamento usado	10.56 g	19.94 g	8.94 g	7.35g
Custo estimado do objeto	0.21 €	0.50 €	0.22€	0.18 €
Tempo de impressão	1h:27m	1h:57m	1h:26m	1h:35m

Tabela 12 - Informações sobre as configurações realizadas para os acessórios de tubagens em PLA e respetiva Impressão 3D

Quanto às curvas a 45°, a alteração da sua posição beneficiou em tudo a impressão da peça, ainda mais em conjunto com a modificação da opção da sua velocidade para modo “qualidade”, o que pode ter aumentado o tempo de produção do modelo, embora não significativamente (cerca de 10 minutos). Por outro lado, esta configuração necessitou de muito menos suportes, o que não só melhorou visivelmente os detalhes e acabamentos da peça, que na segunda tentativa eram bastantes mais complexas, como diminuiu a quantidade de material utilizado e, consequentemente, o seu custo.

Para as peças modeladas de raiz, ou seja, a junta de união e a secção de um tubo de queda, a impressão foi feita em ABS, que seria o filamento mais adequado para a sua produção como peça final, devido às suas propriedades físicas e térmicas. Estas permitem que as peças possam estar expostas ao exterior e pós-processadas com vapores de acetona, tanto para suavizar e homogeneizar as camadas que as constituem, como para colar múltiplas peças, dissolvendo as suas interfaces igualmente com acetona.

Os modelos 3D de ambos os objetos foram criados no *AutoCAD*, com recursos a técnicas de extrusão de círculos 2D e posterior subtração entre si. Algo que não parecia causar grandes dificuldades, revelou-se um pouco mais complicado, pois a primeira tentativa da Impressão 3D da junta de união falhou. Apesar de na janela de visualização do programa, os contornos do modelo se encontrarem redondos, quando exportados para STL, ficavam definidos por linhas retas, facetando o modelo quando impresso, primeiramente em PLA. No entanto, apenas foi necessária uma rápida pesquisa na Internet em vários fóruns dedicados à discussão de projetos de Impressão 3D para o problema ter sido resolvido.

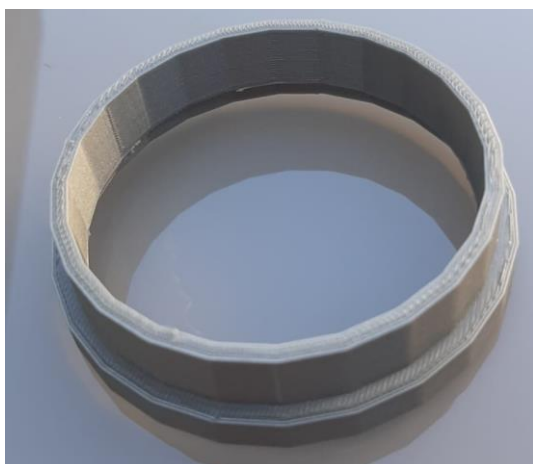


Figura 86 - Resultado da Impressão 3D da junta de união com os contornos facetados



Figura 87 - Resultado da Impressão 3D da junta de união demasiado pequena

Assim, apenas foi preciso alterar uma opção no *AutoCAD* que ajusta a suavidade dos contornos de objetos sólidos. Para o efeito, existem duas formas rápidas: alterar a resolução das facetas dos objetos de 0.5 (valor mínimo) para 10 (valor máximo), ou apenas utilizando um comando específico de Impressão 3D (*3DPRINT*) que realiza automaticamente esta transformação. Ultrapassado este entrave, foi possível imprimir ambas as peças com o aspeto desejado. A junta de união foi disposta ao contrário, isto é, com a sua parte superior assente na plataforma de impressão, pois foi a configuração que gerou menos suportes. Já a pequena secção do tubo foi impressa diretamente sem qualquer suporte, visto que se tratava de uma extrusão simples.

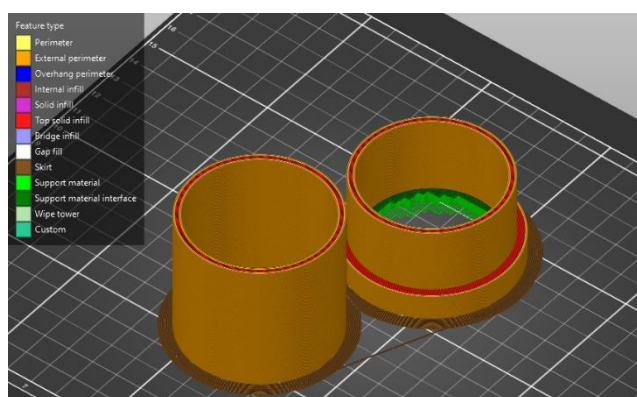


Figura 88 - Visualização do modelo da junta de união e tubo laminados no *PrusaSlicer*

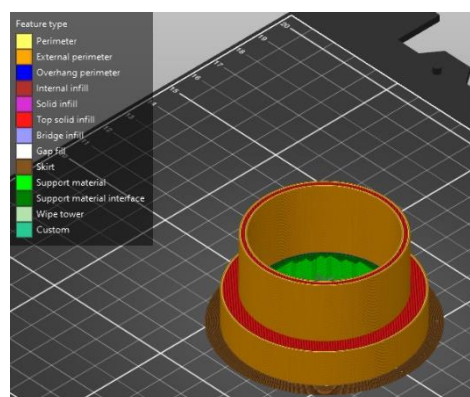


Figura 89 - Visualização do modelo da segunda junta de união no *PrusaSlicer*

Embora os resultados de ambas as peças tivessem sido, à primeira vista, bastante agradáveis em termos de acabamentos e robustez, o tubo deveria encaixar na junta, o que não aconteceu. Esta é uma das consequências da dificuldade em imprimir filamentos de ABS. Por causa do seu elevado ponto de fusão e consequente reação à diferença térmica entre a temperatura ambiente, quando arrefecido tende a encolher, o que fez diminuir em poucos milímetros o diâmetro da abertura da junta. Deste modo, foi necessário imprimir uma segunda junta de união, com uma tolerância de 1 mm, para que então o tubo tivesse espaço suficiente para entrar dentro da união. A fim de que as peças ficassem completamente embutidas uma na outra e estanques, foi-lhes adicionado um anel de borracha entre o pequeno espaço deixado propositadamente para este encaixar o mais ajustadamente possível.

Configurações no <i>PrusaSlicer</i>	Junta de união + Tubo	2ª Junta de união
Filamento	ABS	ABS
Altura das camadas	0.15 mm	0.15 mm
Modo de velocidade	Qualidade	Qualidade
Suportes	Sim	Sim
Borda	Sim	Sim
Densidade de preenchimento	30%	30%
Escala	100%	100%
Informação gerada no <i>PrusaSlicer</i>	Junta de união + Tubo	2ª Junta de união
Comprimento de filamento usado	13.85 m	8.64 m
Volume de filamento usado	3302 mm ³	20789 mm ³
Massa de filamento usado	35.97 g	22.45 g
Custo estimado do objeto	1.00 €	0.62 €
Tempo de impressão	6h:57m	3h:54m

Tabela 13 - Informações sobre as configurações realizadas para os acessórios de tubagens em ABS e respetiva Impressão 3D

A qualidade de impressão destas peças foi bastante otimizada e, para o efeito, escolheu-se uma altura baixa para a altura das camadas (0.15 mm), no modo de “qualidade”, o que gerou muitos bons resultados, embora à custa de um tempo de impressão mais elevado, em comparação com as peças anteriores, que foram impressas com alturas das camadas maiores. Como a junta de união necessitou de ser novamente projetada, essa correção levou a uma nova impressão, que facilmente e em poucas horas reparou o erro cometido inicialmente, possibilitando assim a intenção primária de fixar corretamente as duas peças.

5.1.3. ACESSÓRIOS DE CAIXILHOS

Com as lições aprendidas e consolidadas com as primeiras Impressões 3D realizadas, as peças que se seguem foram impressas muito mais rapidamente, numa só tentativa e, ainda assim, com ótimos resultados. O canto de caixilho que foi impresso em 3D é constituído por 3 peças: uma secção com 5 cm de altura do poste de caixilho que constitui uma extrusão vertical de uma secção complexa, com bastante detalhe e com algumas paredes muito finas; uma secção da calha inferior, também com 5 cm, mas de comprimento, que remata a parte inferior do caixilho; e uma calha pequena que seria para encaixe do vidro do mesmo. As peças foram impressas ao mesmo tempo e colocadas sobre a plataforma da

forma mais otimizada possível, pelo que não foram necessárias quaisquer estruturas de suporte. Por se tratar apenas de uma peça de prototipagem, esta foi impressa sob condições normais, isto é, com uma altura das camadas de 0.2 mm, no modo de “qualidade”.

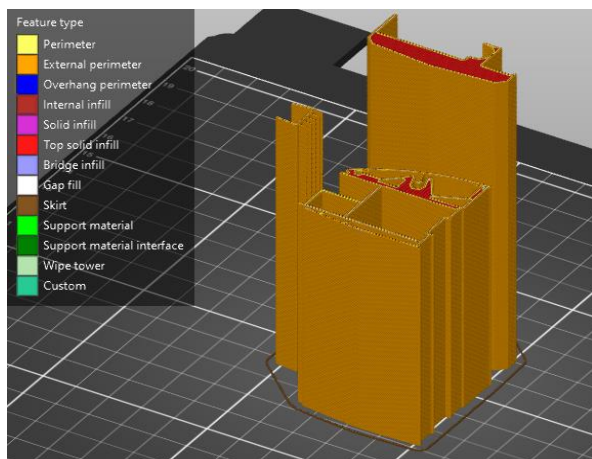


Figura 90 - Visualização dos modelos laminados que constituem um canto de caixilho no *PrusaSlicer*

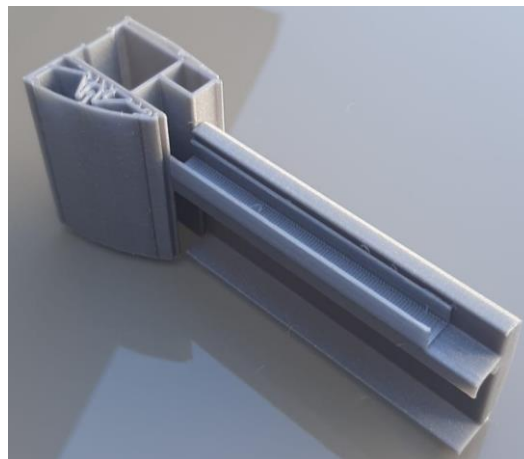


Figura 91 - Resultado da Impressão 3D do canto de caixilho, com as peças já coladas

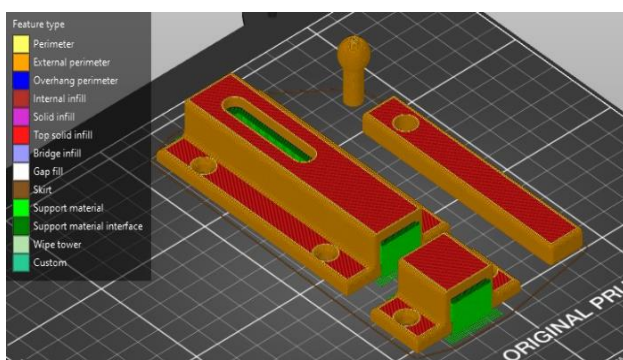


Figura 92- Visualização dos modelos laminados que constituem um fecho de correr no *PrusaSlicer*

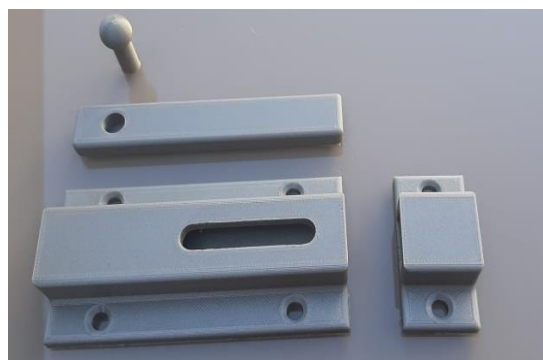


Figura 93 - Resultado da Impressão 3D das peças constituintes do fecho de correr

Já o fecho destinado a ser aparafusado a uma porta foi impresso com uma altura das camadas menor (0.15 mm), no mesmo modo de velocidade. Contudo, para lhe providenciar mais robustez e resistência, a densidade de preenchimento foi aumentada para 50%. Os resultados para cada uma das peças que constituem o fecho foi surpreendente, graças à sua modelação perfeita e à otimização dos parâmetros de impressão, mesmo tendo sido necessárias algumas estruturas de suporte no interior de duas peças. Como expectável, segundo estas condições, o tempo de impressão aumentou significativamente (para cerca de 7 horas e meia), embora tivesse ficado pronta em menos tempo do que um dia normal de trabalho de 8 horas.

No final da Impressão 3D das peças do fecho de correr, estas foram convenientemente montadas, tendo sido colado o pino no seu respetivo orifício na barra deslizante e aí colado com a mesma barra já no interior do corpo principal. Este e a outra peça fixa, foram posteriormente aparafusadas a duas tábuas de madeira, de modo a perceber como funcionaria esta componente. A barra conseguiu deslizar e encaixar nas duas peças fixas sem problemas e todas as peças ficaram adequadamente fixadas à madeira

e entre si, pelo que poderia funcionar perfeitamente como uma peça final e funcional, a um custo muito baixo (1.51 €). Caso a sua utilização fosse destinada a uma porta exterior, o fecho deveria ser impresso em ABS e não em PLA, dado que este facilmente se deteriora no meio exterior, por ser biodegradável.



Figura 94 – Fecho montado e aparafusado, completamente funcional

Configurações no <i>PrusaSlicer</i>	Canto de caixilho	Fecho de correr
Filamento	PLA	PLA
Altura das camadas	0.2 mm	0.15 mm
Modo de velocidade	Qualidade	Qualidade
Suportes	Não	Sim
Borda	Sim	Não
Densidade de preenchimento	15%	50%
Escala	100%	100%
Informação gerada no <i>PrusaSlicer</i>	Canto de caixilho	Fecho de correr
Comprimento de filamento usado	16.42 m	20.25 m
Volume de filamento usado	39492 mm ³	48704 mm ³
Massa de filamento usado	48.97 g	60.39 g
Custo estimado do objeto	1.22 €	1.51 €
Tempo de impressão	7h:47m	7h:25m

Tabela 14 - Informações sobre as configurações realizadas para o canto de caixilho e fecho de correr e respetiva Impressão 3D

5.1.4. CANTOS DE RODAPÉS

As últimas peças impressas foram modeladas tridimensionalmente a fim de serem testadas para a atual dissertação, com recurso a técnicas simples de extrusão de perfis 2D e posterior união, formando assim duas configurações diferentes para o mesmo tipo de rodapé: o primeiro a 90° e o segundo a 137°.

Os dois cantos de rodapés foram produzidos com ABS, de forma a proporcionar-lhes a resistência e robustez desejadas para este tipo de elementos construtivos. Caso o objetivo fosse

implementá-los em ambiente hospitalar, as suas superfícies poderiam ser suavizadas com vapores de acetona, conferindo-lhes um aspeto totalmente liso, o que garantiria os requisitos de limpeza antibacterianas que este género de ambientes exige.

Ambos os cantos foram totalmente impressos sem estruturas de suporte e os resultados foram bastante favoráveis, à exceção de um pequeno defeito no canto de rodapé a 137°, em que a secção arredonda levantou um pouco, criando assim uma falha de pequena dimensão, mas que poderia ser fácil e igualmente tratada com recurso a vapores de acetona.

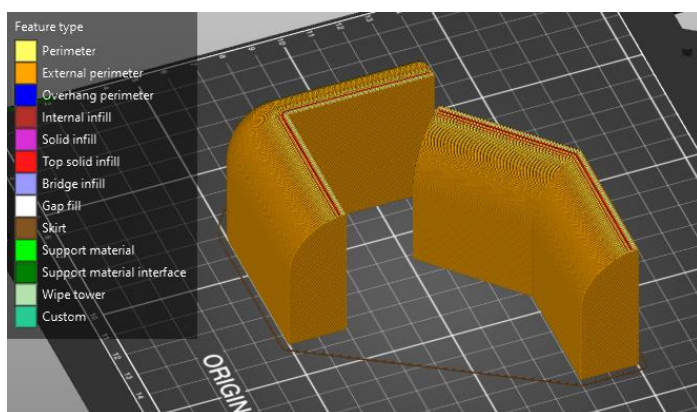


Figura 95 - Visualização dos modelos laminados de cantos de rodapés no PrusaSlicer



Figura 96 - Resultado da Impressão 3D dos rodapés em ABS

Configurações no <i>PrusaSlicer</i>	Cantos de rodapés
Filamento	ABS
Altura das camadas	0.2 mm
Modo de velocidade	Qualidade
Suportes	Não
Borda	Não
Densidade de preenchimento	20%
Escala	100%
Informação gerada no <i>PrusaSlicer</i>	Cantos de rodapés
Comprimento de filamento usado	24.80 m
Volume de filamento usado	59646 mm ³
Massa de filamento usado	64.42 g
Custo estimado do objeto	1.79 €
Tempo de impressão	6h:56m

Tabela 15 - Informações sobre as configurações realizadas para os cantos de rodapés e respetiva Impressão 3D

5.2. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A qualidade das peças obtidas com os testes de Impressão 3D realizados foi, certamente, resultado da combinação dos diferentes parâmetros de impressão configurados para cada uma delas e das condições de funcionamento que a impressora 3D disponível ofereceu. Isto porque o alcance destes parâmetros também depende do tipo de equipamento, neste caso FDM, a que se recorre, dado que este apenas é compatível com uma pequena gama de materiais polímeros e de diâmetros de bicos extrusores. Portanto, a otimização dos parâmetros de processamento tende claramente a melhorar as propriedades dos objetos impressos e a reduzir a necessidade de pós-processamento dos mesmos, dado que afetam diretamente a ligação entre as camadas depositadas, bem como a sua consistência. Além disso, é de igual importância optar pelo tipo de filamento mais adequado, de acordo com a aplicabilidade das peças.

Como o presente estudo apenas se focou em explorar os parâmetros fundamentais e mais simples que o programa de laminação utilizado oferece, estes corresponderam às variáveis dos casos de estudo, sendo que existem muitos outros que poderiam ter sido tratados. No entanto, por exigirem um estudo mais aprofundado acerca dos seus impactos, teria sido necessário realizar inúmeros testes e ganhar mais experiência com a impressora e, por isso, estes foram considerados como constantes para todas as impressões 3D concretizadas. Assim, as variáveis estudadas foram: a posição do objeto, a altura das camadas, o modo de velocidade de impressão, a densidade de preenchimento e a utilização de bordas ou jangadas.

Embora não tenha sido um estudo de parâmetros exaustivo, os que foram considerados influenciaram diretamente tanto a eficiência da produção como das características das peças e, relativamente a estas, foram tidas apenas em consideração a qualidade dos acabamentos da superfície, a precisão dimensional, o tempo e o custo por impressão. Não foram avaliadas as peças quanto às suas propriedades mecânicas, como a resistência à flexão, à compressão e à tração. Contudo, uma investigação neste sentido é de máxima relevância para averiguar a aplicabilidade da Impressão 3D em peças funcionais, que podem estar sujeitas a cargas ou tensões, como é bastante frequente na Indústria da Construção.

5.2.1. PRECISÃO DIMENSIONAL

Para peças funcionais, a precisão dimensional é uma propriedade de máxima relevância e pode ser melhorada com o ajuste adequado dos parâmetros de impressão. É igualmente a característica que compara os resultados das dimensões das peças impressas com o que foi planeado em fase de projeto e concretizado na modelação 3D. De facto, pode surgir uma ligeira variação neste sentido e existem alguns fatores que a podem influenciar.

Por exemplo, por característica dos próprios polímeros, estes sofrem pequenas contrações quando resfriam e, por isso, com materiais com uma elevada temperatura de fusão essa contração será maior, pois o resfriamento das camadas depositadas será mais rápido, graças à maior diferença de temperatura que irá existir relativamente ao meio ambiente. Esta ocorrência foi observada nas peças impressas em ABS, devido à alta temperatura de impressão que este material requer e, por esta razão, as tolerâncias de encaixe para a junta de união e o tubo foram aumentadas. Enquanto as peças em PLA não apresentaram uma variação significativa e, por isso, para as peças de encaixe deste tipo foi considerada uma tolerância aproximada de 0.5 mm, já para as peças em ABS foi considerada uma tolerância de 1 mm, o que já influenciou bastante o segundo resultado. Assim, foi possível encaixar o tubo à junta de união, ainda que com uma ligeira folga, para acrescentar um anel de borracha para ajudar a selar convenientemente o seu interior. Desta forma, entendeu-se que antes de imprimir uma peça final,

o ideal será imprimir uma peça de teste com um encaixe (por exemplo, do tipo macho-fêmea) e utilizar e validar as tolerâncias que proporcionaram o melhor efeito para a impressão oficial.

Para as outras peças de encaixe estudadas, como o canto de caixilharia e o fecho de correr, foi tida em conta a densidade de preenchimento da peça que, quando excessiva, pode prejudicar a precisão dimensional e a altura das camadas. Quanto mais baixas, mais uniformes ficaram as paredes das peças e, por isso, apresentaram uma maior fidelidade ao projeto.



Figura 97 – Peças impressas da junta de união e tubo perfeitamente encaixadas e seladas



Figura 98 – Anel de borracha utilizado para selar a junção das duas peças

5.2.2. QUALIDADE DOS ACABAMENTOS

O nível de rugosidade das superfícies dos produtos impressos pode ser um bom critério para avaliar a qualidade dos seus acabamentos, pois pode efetivamente influenciar alguns requisitos técnicos para peças funcionais ou mecânicas. Por exemplo, para os acessórios de tubagens, esse nível de rugosidade é de extrema relevância para assegurar a devida estanquidade das respetivas peças e para que não existam infiltrações ou fugas com origem nas aberturas microscópicas entre as camadas, e para os rodapés em ambientes hospitalares, que necessitam de ser devidamente limpos, não podendo existir resíduos de bactérias ou microrganismos entre os estratos.

Foram vários os fatores que tiveram impacto na qualidade das superfícies dos objetos impressos, começando pela resolução gráfica dos ficheiros STL até à definição dos parâmetros de processamento. Como explicado no caso da junta de união, em que a peça foi originalmente modelada, a resolução das facetas foi aumentada para o seu valor máximo no *AutoCAD*, aquando da sua exportação para STL, resolvendo assim o problema das superfícies redondas facetadas que surgiu na sua primeira impressão.

Por outro lado, a definição da posição mais adequada das peças na plataforma também tende a melhorar os acabamentos das impressões 3D, dado que influencia diretamente a quantidade de estruturas de suporte necessária para sustentar partes dos objetos sem apoio. Assim, quanto mais suportes forem utilizados, mais irregularidades irão surgir na sua interface com as paredes, o que por sua vez irá

aumentar os processos de pós-processamento para tratar as zonas das peças danificadas. Além disso, a utilização de uma borda mostrou-se sempre mais favorável do que a sua não aplicação, pois evitou que as bases das peças não se estragassem aquando da sua remoção da plataforma de construção. Para otimizar ainda mais a qualidade das peças, optou-se por escolher o modo de “qualidade” para a velocidade de impressão.

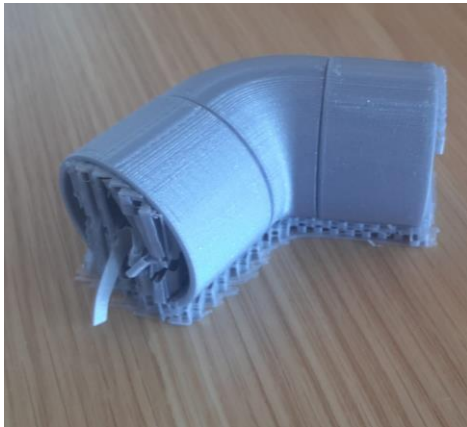


Figura 99 – Curva a 45° impressa com demasiadas estruturas de suporte



Figura 100 – Curva a 45° após terem sido retiradas as estruturas de suporte

Sem dúvida que a peça que mostrou melhores resultados em termos de acabamentos foi o fecho de correr, embora os seus parâmetros fossem os mais ajustados para a máxima qualidade: altura das camadas baixa (0.15 mm), utilização de borda, modo de velocidade de “qualidade” e densidade de preenchimento de 50%. Este último parâmetro conferiu mais robustez à peça, sem que isso interferisse com a sua precisão dimensional (esta não deve ultrapassar os 80% para peças de encaixe). Outra condicionante foi o facto de a peça ter sido impressa com as suas faces maiores paralelas à plataforma, porque, de um modo geral, as superfícies laterais sofrem mais anomalias do que as superiores, independentemente dos parâmetros definidos.

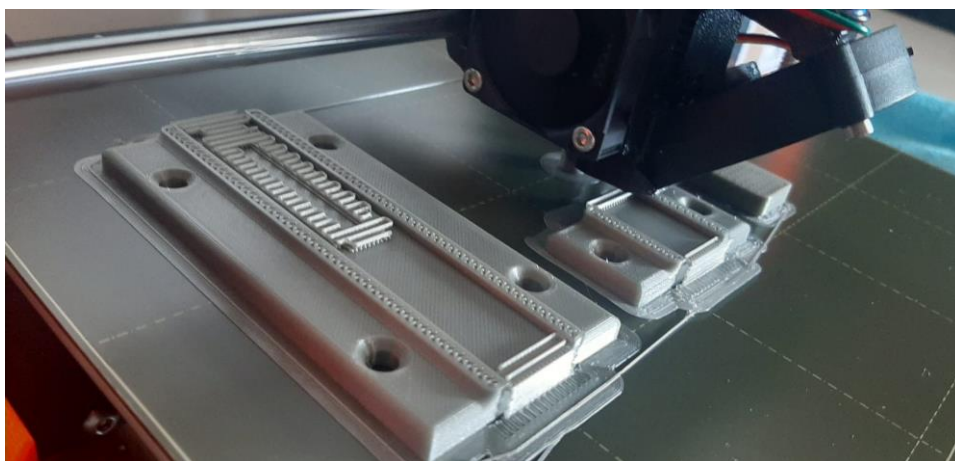


Figura 101 – Peças do fecho de correr a serem impressas com bordas

5.2.3. TEMPO DE IMPRESSÃO

Para que um dia seja possível a Impressão 3D substituir os processos de fabrico tradicionais, a redução do tempo de produção é essencial e, por isso, é de extrema importância controlar certos impasses que possam ocorrer durante a impressão das peças. Por outro lado, tal como as outras propriedades dos objetos impressos mencionadas anteriormente, o tempo de impressão pode ser minimizado, escolhendo a combinação ótima de parâmetros de processamento para o efeito.

Tendo em conta os resultados obtidos, o tempo de impressão foi reduzido com o aumento da altura das camadas, com a redução da densidade de preenchimento, com a minimização da quantidade de estruturas de suporte e quando a orientação total das peças foi de 0°.

Por outro lado, existiram alguns contratemplos que, apesar de não terem sido refletidos no tempo real da impressão das peças, atrasaram todo o processo, adiando assim o início da sua produção. Foi o caso das impressões em que foi utilizado o filamento de ABS que, mais uma vez, devido à sua elevada temperatura de fusão, fez com que as primeiras camadas depositadas na plataforma tendessem a descolar rapidamente, tendo sido muitas vezes necessário parar a impressão, limpar a placa removível com recurso a uma espátula e repetir novamente a impressão falhada. Com as diversas tentativas, acabou por se criar um micro clima ao redor da área onde os objetos seriam impressos, bem como do bico extrusor, reduzindo desta forma a diferença de temperatura entre as camadas extraídas e o meio ambiente, pelo que no fim da segunda ou terceira tentativa, a peça começou a aderir perfeitamente à plataforma. Contudo, este processo gerou bastante desperdício de material, o que poderia ter sido acautelado se se tivessem sido aplicadas fitas autocolantes de poliamida à placa removível, resistentes a altas temperaturas e frequentemente utilizadas para reduzir o efeito de contração na base das peças em ABS (ou outros materiais como o HIPS, PC, etc.).



Figura 102 – Efeito de contração das primeiras camadas depositadas com ABS

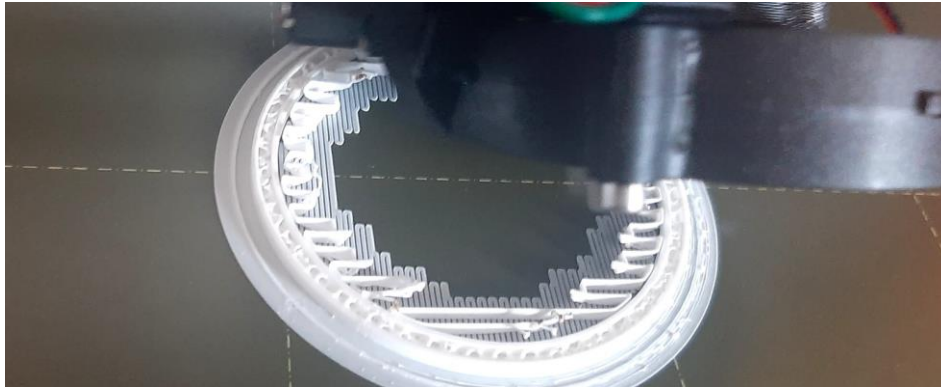


Figura 103 – Primeiras camadas depositadas em ABS a aderirem perfeitamente à placa de aço removível

5.2.4. CUSTOS DE PRODUÇÃO

Os custos inerentes às impressões 3D das peças, como é fácil de perceber, estão relacionados com a quantidade de material despendido para as mesmas. Esta quantidade pode ser controlada com a diminuição da altura das camadas e da densidade de preenchimento, além da otimização da orientação das próprias peças, de forma a gerar o mínimo de estruturas de suporte ou até mesmo eliminá-las, dado que estas aumentam significativamente a quantidade de filamento utilizado, com a agravante de que será material desperdiçado.

No casos das componentes industriais, como os cogumelos de proteção e os espaçadores de cofragens, é difícil de competir com os preços atuais de mercado, dado que estes são vendidos em massa (quantidades como 100 ou 250 unidades), o que faz diminuir os seus preços por unidade. Estes também variam consoante o fabricante, pelo que os seus preços podem variar entre os 5 e os 30 centavos por cogumelo/espaçador. Contudo, as referidas peças impressas não geraram custos muito mais elevados, sendo que a impressão 3D do cogumelo, de diâmetro 16 mm, teve um custo de 34 centavos e os espaçadores, com uma altura de recobrimento de 30 e 25 mm, custaram 17 e 28 centavos, respetivamente. Para uma quantidade elevada deste tipo de peças, esta tecnologia pode não parecer uma solução eficiente ou económica, no entanto, durante a produção de edifícios, existem situações em que faltam apenas alguns destes elementos ou que até seria prático adaptá-los para uma determinada situação ou problema. Nestes casos, a presença de uma impressora 3D em obra pode acelerar muitos processos e até otimizá-los.

Já em relação aos acessórios de tubagens, para ser possível aplicar essas peças como produtos finais, teriam de ser realizados mais estudos e testes, para que todas as exigências de desempenho como a estanquidade, a resistência às pressões internas e à corrosão, fossem cumpridas, segundo as normas técnicas e requisitos de conformidade. Por outro lado, a Impressão 3D tem potencialidades para, no futuro, ser uma solução para problemas de compatibilização entre especialidades, dada a sua capacidade de produzir objetos personalizados, que muitas vezes não existem no mercado ou são muito raros. Atualmente, encomendar um acessório de tubagem com geometrias ou dimensões diferentes das habituais pode significar aumentar substancialmente os custos de um projeto de instalações hidráulicas e atrasar as tarefas de uma obra. Assim, se fosse possível produzir uma peça destas no local de produção e em poucas horas, os problemas apontados poderiam ser acautelados. Neste momento, devido à falta de regulamentação acerca do fabrico de peças via Impressão 3D FDM, esta tecnologia poderia ser implementada com o objetivo de substituição temporária de objetos que podem demorar a chegar às

obras ou então como prototipagem rápida, ajudando no estudo de novas soluções, a um preço muito baixo. Por exemplo, a junta de união com 50 mm de diâmetro interno teve um custo de 1.00 € e poderia ser facilmente utilizada como peça de substituição temporária.

O mesmo acontece com os acessórios de caixilhos de portas ou de compartimentos de chuveiros. Por vezes, é necessário reparar algumas peças destes sistemas e a Impressão 3D FDM pode ser uma solução económica e rápida para substituir ou melhorar alguns dos seus componentes. Com o presente estudo, provou-se que uma impressora 3D de baixo custo consegue conceber geometrias intrincadas e funcionais e que, quanto mais otimizados forem os parâmetros de processamento, os resultados serão também cada vez mais surpreendentes. O fecho de correr de uma porta, ainda que bastante simples, apenas custou 1.51 € para ser fabricado, constituído um exemplo de uma aplicação praticável em obra, onde muitas vezes é necessário criar espaços fechados e temporários, como escritórios ou estaleiros.

Os dois cantos de rodapés impressos foram produzidos ao mesmo tempo e o custo total da impressão foi de 1,79 €. Ainda que este preço não compita com o custo por metro linear que os fabricantes de rodapés oferecem, pode constituir uma solução barata para cantos ou formas de paredes complexas que, normalmente, exigem cortes ou moldes específicos, cujo resultado final não é, por vezes, tão satisfatório como o pretendido [95], [94].

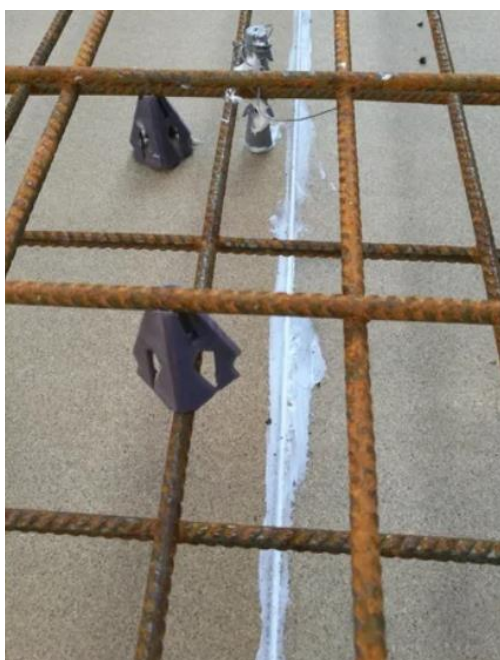


Figura 104 – Exemplo de aplicação dos espaçadores pontuais de varões de aço [94]

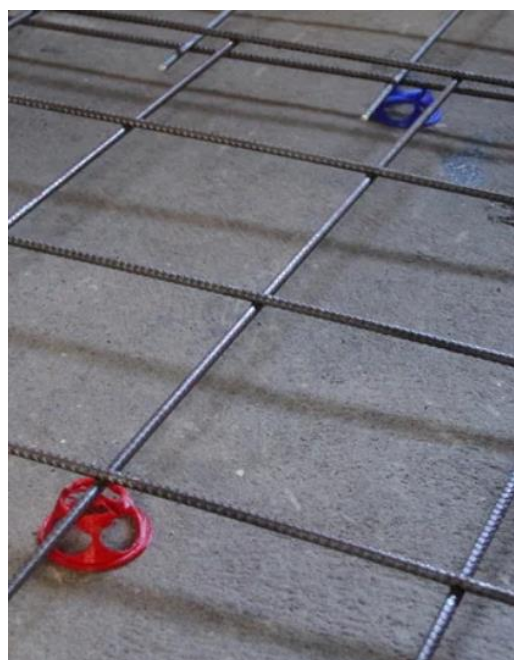


Figura 105 - Exemplo de aplicação dos espaçadores de cruzamento de varões de aço [95]

6

CONCLUSÕES FINAIS E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS DA IMPRESSÃO 3D NA CONSTRUÇÃO

6.1. CONCLUSÕES FINAIS

Com o estudo elaborado para a presente dissertação, foram assimiladas várias matérias e procedimentos relacionadas com a Impressão 3D, nomeadamente, a sua origem e evolução nos últimos anos, as principais tecnologias que lhe estão associadas e o seu fluxo normal de trabalho, que inclui todas as tarefas e desafios do pré e pós processamento e do decurso do mesmo processamento. Os conhecimentos e competências adquiridas sobre este tema foram aplicados de uma forma específica à análise do seu emprego na Indústria da Construção, do mesmo modo como já tem sido praticado por outros setores industriais.

Comprovou-se também que, na área da Construção, têm surgido e vencido, nos últimos anos, novas abordagens e inovações relacionadas com a Impressão 3D, abrindo assim um novo mundo de oportunidades a este setor, sobretudo com uma maior hipótese de personalização dos seus produtos (desde pequenos elementos construtivos até edifícios integrais) e respetiva otimização, uma vez que com esta tecnologia é viável alterar as configurações dos modelos de forma a reduzir a quantidade de material e tempo despendido para a produção dos mesmos. Apesar de muitas das aplicações de Impressão 3D na construção ainda não passarem de testes experimentais, estes são extremamente necessários e importantes para que a evolução desta nova tecnologia continue, até começar a ser possível substituir as técnicas mais comuns e tradicionais, com a garantia de que os seus requisitos fundamentais sejam cumpridos, possibilitando assim a resolução de muitos problemas de sustentabilidade ambiental e financeira inerentes à IC.

Também para o presente estudo, foram fornecidos alguns exemplos de aplicação de Impressão 3D na criação de utensílios, produtos e protótipos relacionados com a atividade da construção com recurso a uma impressora 3D de baixo custo e com o objetivo de evidenciar as suas potencialidades enquanto ferramenta pessoal de alta tecnologia, mas bastante acessível, quer em termos de custo quer na aprendizagem do seu manuseamento. Para o efeito, foram descritos todos os recursos tecnológicos disponíveis bem como os materiais e programas informáticos compatíveis, todas as etapas de preparação dos modelos em estudo para a sua impressão e os testes a estes realizados com a referida impressora 3D.

6.1.1. PREPARAÇÃO DOS MODELOS 3D

A forma como foi realizado o pré-processamento dos modelos dos casos de estudo sugeridos para a presente dissertação pode ser considerada exemplar porque, apesar de terem surgido alguns impasses, estes foram rapidamente solucionados, podendo afirmar-se que todo o processo correu como era esperado. Alguns modelos foram facilmente adquiridos em plataformas digitais como bibliotecas de

modelos 3D, tanto em formato CAD como em formato STL, gratuitamente, o que acelerou bastante o processo da obtenção dos modelos 3D dos casos de estudo, que de uma forma geral, é a fase que consome mais tempo, em todas as etapas de Impressão 3D. Já os modelos originalmente concebidos foram criados em programas informáticos correntes na IC, o *AutoCAD* e o *Revit*, pelo que não foi necessário comprar e aprender uma nova ferramenta de modelação 3D, uma vez que estes programas já se encontram preparados para a sua utilização no âmbito da Impressão 3D, mesmo que, como no caso do *Revit*, tenha sido indispensável adicionar uma extensão, para ser possível exportar os modelos CAD nele criados, para STL.

Contudo, esta tarefa mostrou-se mais eficiente no *AutoCAD*, dado que este apresenta uma maior variedade de definições de exportação dos modelos para ficheiros STL, tendo sido assim possível otimizar algumas variáveis, como aconteceu com o aumento da resolução das facetas dos contornos das peças, em que se optou pela resolução máxima possível, conferindo o aspeto real e desejado às peças impressas. Por outro lado, o *Revit* revelou que as suas capacidades de parametrização dos modelos, e consequente criação das respetivas famílias, pode acelerar o processo de modificação ou personalização dos mesmos, deixando de ser necessário modelar o mesmo objeto (ainda que este apresente dimensões diferentes) várias vezes, como foi exemplo a família *Revit* dos cogumelos de proteção. Graças à interoperabilidade existente entre estes dois programas, foi possível ultrapassar todas as dificuldades que foram surgindo, ora num programa ora noutro.

Relativamente à preparação dos modelos STL para impressão, esta foi executada no programa de laminação disponibilizado gratuitamente pela empresa fabricante da impressora 3D utilizada para o presente estudo, o *PrusaSlicer*. A interação do utilizador com o programa é bastante simples e intuitiva, não tendo surgido, por isso, dificuldades na sua aplicação. Esta simplicidade deve-se igualmente ao modo de apresentação e utilização das ferramentas nele existentes e à disponibilização de perfis de definições pré-concebidos pela própria empresa do programa, consoante o tipo de filamento, impressora e suas componentes, utilizadas para cada impressão. Neste caso, apenas foram alteradas as configurações no modo “simples” do laminador, embora com o aumento da experiência e conhecimento acerca das capacidades e recursos que o programa oferece, bem como da própria impressora 3D, outros parâmetros que se encontram no modo “avançado” poderem ser alterados ou otimizados, de forma a obter cada vez melhores resultados.

Com o estudo realizado a partir da variação dos parâmetros de impressão do modo “simples”, percebeu-se que para se obter uma peça com maior qualidade, as definições devem ser otimizadas, o que pode significar reduzir a altura das camadas ou escolhendo o estilo de velocidade designado por “qualidade”, à custa de um de tempo mais prolongado de impressão. A visualização do modelo fatiado no *PrusaSlicer* revelou-se bastante precisa, tendo correspondido sempre ao resultado físico final. A identificação por cores dos diferentes tipos de camadas também se apresentou extremamente útil para a perceção da forma como as peças são construídas e para a antecipação de possíveis problemas que poderiam ocorrer durante a sua produção, por exemplo, na execução de pontes ou de saliências críticas sem estruturas de suporte.

Da mesma forma, as estruturas de suporte geradas automaticamente pelo programa resolveram sempre a necessidade de suporte que algumas peças com geometrias mais complexas apresentaram, não tendo sido necessário, para qualquer caso, a introdução manual deste género de fixação nas peças. Por esta razão, foi fácil prever a quantidade de suportes que um determinado objeto necessitaria, segundo a sua disposição na plataforma de impressão, pelo que, muitas vezes, a escolha da sua posição resultou de um processo iterativo entre a colocação da peça na plataforma e a respetiva subdivisão em camadas, antes da sua exportação para *G-code*.

De facto, os fatores que mais influenciaram a soma de material gasto e a duração das impressões 3D foram a quantidade de estruturas de suporte que as peças necessitaram e a densidade de preenchimento definida para as mesmas. Optou-se, então, para a maioria das peças, por um preenchimento entre os 15-20%, de forma a poupar o máximo de material por objeto, sem que isso causasse danos à sua integridade. Consequentemente, como seria de esperar, quanto menos material for utilizado, mais barata é a produção dos objetos impressos, pelo que, jogando com estas variáveis, é possível fazer uma gestão eficiente dos gastos, investindo menos material e tempo para peças de prototipagem e apostando mais nos produtos finais. Assim, conclui-se que os testes realizados aos diferentes parâmetros de impressão assim como às diversas formas de obter modelos CAD 3D, possibilitaram estudar empiricamente o funcionamento das técnicas do pré-processamento da Impressão 3D no fabrico de peças volumétricas, permitindo compreender melhor como as geometrias das peças devem ser geridas neste tipo de Fabricação Aditiva.

6.1.2. IMPRESSÃO DOS MODELOS 3D

O manuseamento da impressora 3D que foi disponibilizada, a *i3 MK3S* da *PrusaResearch*, também se revelou bastante compreensível, tendo sido apenas realizadas algumas calibrações e ajustes antes da sua utilização. Com a impressora 3D, a empresa oferece um manual de utilização deveras detalhado, o que auxiliou em todos os procedimentos necessários para tornar a impressora completamente operacional. Futuramente, a impressora necessitará de mais processos de manutenção, tal como foram todos acautelados e explicados no mesmo manual. Além disso, a empresa oferece atendimento ao cliente, caso surjam outro tipo de dúvidas ou complicações, pelo que o apoio por parte do fabricante é bastante acessível.

Os materiais escolhidos para a Impressão 3D dos casos de estudo foram também fabricados pela *PrusaResearch*, uma opção segura e prática, dado que muitas das definições já estavam preparadas para os seus materiais específicos tanto no *PrusaSlicer*, como na própria impressora. As peças em PLA foram bastante mais fáceis de imprimir do que as em ABS, tal como era expectável, tendo em conta o estudo prévio realizado sobre os materiais compatíveis com a tecnologia de FDM que a impressora 3D utiliza. Nas peças em ABS, foram sempre necessárias várias tentativas, até as primeiras camadas deixarem de se descolar da placa de aço aquecida. As diversas tentativas geravam um microclima aquecido na área onde o objeto iria ser impresso, daí que a tendência do ABS em encolher com a diferença de temperatura também foi reduzindo com o aumento de temperatura ao redor do bico, começando finalmente as primeiras camadas a aderir impecavelmente à plataforma, à segunda ou terceira tentativa. Geralmente, depois de as primeiras camadas ficarem corretamente fixadas à base, as impressões dos objetos ocorriam sem problemas. No entanto, é imprudente não vigiar a impressão durante muitas horas, pois no caso de objetos estreitos e altos, estes podem perder o equilíbrio e cair durante a impressão, como aconteceu na primeira vez que o poste de caixilharia foi testado.

As peças testadas serviram sobretudo para compreender quais os tipos de peças que a impressora 3D disponível poderia concretizar sem problemas, visto que é considerada um equipamento para uso pessoal mais do que profissional. Contudo, os objetos criados obtiveram resultados de muita qualidade e, por isso, o seu uso não foi tão limitado como pode parecer. De facto, uma impressora desta gama, apesar da reduzida área de construção que oferece, tem efetivamente espaço no mundo da Construção, porque existem muitas componentes de sistemas construtivos de tamanho pequeno que podem ser facilmente fabricados via Impressão 3D e que resultam em peças totalmente funcionais, de baixo custo e altamente personalizáveis. Os testes realizados também mostraram que a presença de uma impressora de baixo custo, por exemplo, num estaleiro de obra, pode apresentar várias vantagens: possibilitar a

reparação ou substituição rápida de alguma peça danificada; solucionar problemas de incompatibilização de diferentes projetos; acautelar falhas na gestão do *stock* de pequenos componentes industriais; realizar peças de prototipagem a um custo extremamente baixo, beneficiando do rápido processo iterativo que a Impressão 3D proporciona e da produção ambientalmente limpa quando utilizados, para o efeito, filamentos em PLA ou outros biodegradáveis; e, por fim, criar peças com geometrias detalhadas, complexas e não correntes no mercado.

Ora, se uma impressora 3D pequena e amadora apresenta tanto potencial, parece claro que as impressoras 3D profissionais proporcionarão resultados bastante melhores, à custa de um investimento inicial substancialmente maior. Porém, nenhum dos dois tipos de impressoras deve ser posto de parte pelas empresas de Construção, pois ambos os equipamentos apresentarão as suas vantagens e desvantagens. Por exemplo, enquanto as impressoras 3D profissionais apenas funcionam com os materiais permitidos pelo fabricante, já com as de baixo custo é possível utilizar todos os tipos de filamentos, qualquer que seja a marca. Por outro lado, um equipamento 3D profissional está geralmente inserido num compartimento, e não apenas numa estrutura aberta sem controlo da temperatura circundante, como acontece com a impressora amadora disponível, pelo que se torna mais fácil imprimir materiais com elevadas temperaturas de fusão. No entanto, uma condicionante das impressoras profissionais é o facto de o seu código ser privado e suficientemente complexo, exigindo que os utilizadores adquiram formação especializada para as manipularem. Assim, deve refletir-se sobre qual a melhor opção no momento da aquisição de um equipamento de Impressão 3D, pelo facto de que existem diversas formas de tecnologias e, por isso, a aplicabilidade de cada uma deve ser conhecida, para que, no instante da decisão, não se opte por uma máquina de utilização muito complexa ou não adequada ao tipo de projetos a que estaria destinada.

6.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS DA IMPRESSÃO 3D NA CONSTRUÇÃO

No capítulo 2 da presente dissertação, foram expostos vários exemplos de aplicação de tecnologias de Fabricação Aditiva na Construção. Foi também explicado que o conceito geral de Impressão 3D se refere à produção de objetos tridimensionais, camada por camada, controlada por um computador, com base em modelos 3D digitais. O modo de processamento pode ser através da fundição de metais ou materiais à base de pó, ou então com a injeção de materiais líquidos ou semilíquidos, como polímeros, metais, cerâmica, argamassas ou betão, consoante o género de tecnologia associada à impressora 3D em questão. Contudo, no setor da construção, as inovações que surgiram nos últimos anos no âmbito da Impressão 3D ocorreram principalmente nas fases de projeto, engenharia e operações e manutenção da construção. Contudo, esta nova tecnologia refere-se sobretudo à fase real da construção, pelo que foram apresentados vários exemplos de construção de edifícios, moldes impressos, componentes de construção, modelos de arquitetura e projetos de interiores. Por esse motivo, a adoção da Impressão 3D na Construção tem captado cada vez mais a atenção do corpo político e industrial porque, com a rápida urbanização, fortes alterações climáticas e a escassez de recursos, existe uma necessidade emergente de tornar esta indústria mais barata, rápida e limpa. De facto, a Impressão 3D pode ser o ajuste natural à Construção que todos esperavam, graças às características semelhantes ou complementares que as relacionam entre si.

Atualmente, os projetos de construção dependem bastante do conhecimento dos arquitetos e engenheiros projetistas sobre a abordagem de gestão da informação de edifícios BIM e, cada vez mais, os seus clientes requerem produtos personalizados e construídos à sua medida. Ora, a Impressão 3D além de oferecer uma forma de produção precisa e baseada em modelos 3D gerados por computador, em programas como o *Revit*, possibilita a construção rápida e económica de objetos com formas únicas

e complexas, algumas inatingíveis através dos métodos tradicionais correntes. Além disso, por se tratar de uma produção autónoma, esta reduz substancialmente o número de pessoas envolvidas no processos de construção, que atualmente é uma necessidade em crescimento, dada a insuficiência de trabalhadores especializados na construção, em muitos países. Outra vantagem da Impressão 3D é a sua capacidade de trabalhar com uma vasta gama de materiais, incluindo materiais compostos, que também estão muito presentes nos projetos de construção. No entanto, embora a utilização desta tecnologia possa ter efetivamente capacidades para aliviar a Construção da pressão em reduzir os seus custos e acelerar os seus métodos de produção, esta ainda continua bastante limitada e ainda não mereceu um investimento proporcional e desejável.

Este último facto pode estar relacionado com a nova e incomodativa natureza da tecnologia de Impressão 3D que, como qualquer outra inovação, segue o ciclo de desenvolvimento tradicional, na medida em que ainda se encontra no estágio inicial e de demonstração no mercado da IC. Ou seja, este ainda não se encontra preparado e necessita de ser informado sobre as verdadeiras capacidades da Impressão 3D, bem como de todos os seus benefícios e segurança. Além disso, os utilizadores da tecnologia terão de adaptar todos os seus métodos tradicionais e comportamentos para poderem, efetivamente, retirar proveito de todo o potencial das tecnologias 3D e, por isso, a sua educação nesse sentido é essencial. Contudo, outros entraves devem ser ultrapassados: a falta de regulamentos e procedimentos específicos em torno desta temática na Construção e a limitação da Impressão 3D relativamente à fabricação de componentes padronizados, ou seja, aqueles que requerem reforço estrutural, extremamente comuns na construção de edifícios e infraestruturas.

No entanto, existem fortes motivos para acreditar que o uso da Impressão 3D se encontra em expansão no setor da Construção. Estes podem ser económicos, pois à medida que esta forma de fabricação se desenvolve, assim como a de todos os materiais e equipamentos que exige, os seus custos e a sua eficiência melhoram. De igual forma, existem fatores políticos que podem ajudar na promoção da implementação da Impressão 3D neste setor, dado que, cada vez mais, são criadas políticas e iniciativas direcionadas para a gestão eficiente dos recursos e energia e que apostam na economia circular, o que torna prioritário dar mais oportunidades às tecnologias que minimizam o desperdício de recursos, tal como acontece com a Impressão 3D. Pelo facto de também existir uma maior procura, tanto por parte dos arquitetos como dos projetistas, em conceber edifícios e respetivas componentes com características mais diferenciadas e geometrias muito divergentes, as técnicas de Fabricação Aditiva tornam-se cada vez mais apetecíveis. Além disso, e como já mencionado, esta pode resolver a questão pertinente da escassez de mão-de-obra especializada e melhorar substancialmente a produtividade das obras, tornando mais fácil a previsão da sua duração, bem como a sua própria redução, pois os equipamentos podem trabalhar dia e noite, todos os dias. Por último, a Impressão 3D possibilita uma melhor gestão de recursos e a utilização de materiais reciclados, o que pode reduzir significativamente o impacto ambiental que o setor da construção causa diariamente, bem como os custos de produção, o que, por sua vez, desperta o interesse dos donos de obra em investirem mais, quer sejam clientes industriais ou governamentais.

Tendo em conta estes fatores, a Impressão 3D irá proporcionar, sem dúvida, fortes mudanças na Construção, dado que esta responde a várias preocupações-chave que têm impedido a evolução tecnológica do setor. Mas, para o efeito, será importante chamar a atenção e despertar o interesse de todas as partes interessadas, como clientes, instituições públicas, empresas de construção e agentes académicos, a fim de que todos possam contribuir com a sua experiência para o desenvolvimento de competências e meios de aceleração do estágio inicial desta nova tecnologia e, finalmente, também para a sua implementação industrial com padrões de conformidade. É igualmente pertinente uma maior aposta na formação de trabalhadores especializados em modelação digital 3D, sendo que esta é uma das

etapas mais importantes e exaustivas que a Impressão 3D requer. Será necessária, por conseguinte, uma melhoria e atualização dos currículos dos engenheiros civis que integre cursos de modelação 3D, de preferência relacionados com a abordagem de modelação de informação de edifícios (metodologia BIM) [100]. Pelo exposto, espera-se que o presente estudo abra, pelo menos, mais uma janela de para a implementação de uma tecnologia mais sustentável, eficiente e justa ao serviço da Construção e, consequentemente, da Humanidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Gibson, Ian; Rosen, David; Stucker, Brent. *Additive manufacturing technologies 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing*. Springer, New York, 2015.
- [2] C K Chua, K F Leong & C S Lim. *Rapid Prototyping - Principles and Applications*. World Scientific Publishing, Singapore, 2003.
- [3] Candy. *Why Is Rapid Prototyping Manufacturing Important?* Wayken - Rapid Manufacturing, 2019. Disponível em: <<https://www.waykenrm.com/what-the-technologies-are-involved-in-rapid-prototyping.html>>. Data de acesso: 08/04/2019.
- [4] Buswell, R. A.; Soar, Rupert; Gibb, Alistair; Thorpe, Antony. *Freeform Construction: Mega-scale Rapid Manufacturing for construction*. Automation in Construction, 16, 05/2006, p. 224-231.
- [5] Wohlers, Terry; Gornet, Tim. *History of additive manufacturing*. Wohlers report, 24, p. 118. 2014.
- [6] ESTEREOLITOGRAFIA (Disponível em: <http://pt.3dilla.com/impressora-3d/estereolitografia/>). Data de acesso: 12/06/2020.
- [7] Stereolithography, SLA (Disponível em: <https://www.manufacturingguide.com/en/stereolithography-sla>). Data de acesso: 12/06/2020.
- [8] Modelagem por Deposição de Material Fundido (Disponível em: <http://www.ferramentalrapido.ufba.br/fdm.htm>). Data de acesso: 02/03/2020.
- [9] Fused Deposition Modeling, FDM (Disponível em: <https://www.manufacturingguide.com/en/fused-deposition-modeling-fdm>). Data de acesso: 02/03/2020.
- [10] Sinterização Seletiva a Laser (Disponível em: <http://www.ctadvancedmanufacturing.com/pt-pt/impressoes-3d/escolha-por-tecnologia/sinterizacao-seletiva-a-laser/>). Data de acesso: 02/03/2020.
- [11] Selective Laser Sintering, SLS (Disponível em: <https://www.manufacturingguide.com/en/selective-laser-sintering-sls>). Data de acesso: 02/03/2020.
- [12] Gross, Bethany ; Erkal, Jayda; Lockwood, Sarah; Chen, Chengpeng; Spence, Dana. *Evaluation of 3D Printing and Its Potential Impact on Biotechnology and the Chemical Sciences*. Analytical Chemistry, 86, 2014/04/01, p. 3240-3253. American Chemical Society, 2014.
- [13] Van Wijk, A.J.M. ; Van Wijk, I. . *3D Printing with Biomaterials: Towards a Sustainable and Circular Economy*. IOS Press, 2016.
- [14] Binder jetting (Disponível em: <https://www.manufacturingguide.com/en/binder-jetting>). Data de acesso: 03/03/2020.
- [15] Oropallo, William; Piegl, Les A. *Ten challenges in 3D printing*. Engineering with Computers, Vol. 32, p. 135-148. 2016.
- [16] Mellor, Stephen. *An implementation framework for additive manufacturing*. Dissertação de Doutorado. University of Exeter, Exeter, Reino Unido. 2014.
- [17] Gao, Yang; Li, Borui; Wang, Wei; Xu, Wenyaoy; Zhou, Chi; Jin, Zhanpeng. *Watching and Safeguarding Your 3D Printer: Online Process Monitoring Against Cyber-Physical Attacks*. Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies, Vol. 2, 09/18/2018, p. 1-27. 2018.
- [18] Galantucci, L. M.; Lavecchia, F.; Percoco, G. *Study of compression properties of topologically optimized FDM made structured parts*. CIRP Annals, Vol. 57, 2008/01/01/, p. 243-246. 2008.

- [19] Gardan, Nicolas; Schneider, Alexandre. *Topological optimization of internal patterns and support in additive manufacturing*. Journal of Manufacturing Systems, Vol. 37, p. 417-425. 2015.
- [20] Volpato, Neri; Oliveira, Jhsa; Souza, Tr de. *A process planning applicative for rapid prototyping technology*. Annals of the 18th International Congress of Mechanical Engineering Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná Curitiba, Brasil. 2005.
- [21] Portela, Sérgio. *Tudo o que você precisa saber para impressão 3D de peças grandes!* 3DLAB, Disponível em: <<https://3dlab.com.br/impressao-3d-de-pecas-grandes/>>. Data de acesso: 06/03/2020.
- [22] V., Carlota. *Top 10 Best CAD Software For All Levels*. 2019. Disponível em: <<https://www.3dnatives.com/en/top10-cad-software-180320194/>>. Data de acesso: 06/03/2020.
- [23] Yang, Li; Hsu, Keng; Baughman, Brian; Godfrey, Donald; Medina, Francisco; Menon, Mamballykalathil; Wiener, Soeren. *Additive manufacturing of metals: the technology, materials, design and production*. DUC TRUONG PHAM, U. O. B., BIRMINGHAM, UK, Springer, 2017.
- [24] Navangul, Gaurav; Paul, Ratnadeep; Anand, Sam. *Error Minimization in Layered Manufacturing Parts by Stereolithography File Modification Using a Vertex Translation Algorithm*. Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 135, 2013.
- [25] Kulkarni, Prashant; Marsan, Anne; Dutta, Debasish. *A review of process planning techniques in layered manufacturing*. Rapid prototyping journal, 2000.
- [26] Pandey, P. M.; Venkata Reddy, N.; Dhande, S. G. *Part deposition orientation studies in layered manufacturing*. Journal of Materials Processing Technology, Vol. 185, 2007/04/30/, p. 125-131. 2007.
- [27] Porter, Bill. *STL to G-Code: How to Convert STL Files to G-Code*. All3DP, 2019. Disponível em: <<https://all3dp.com/2/stl-to-g-code-how-to-convert-stl-files-to-g-code/>>. Data de acesso: 06/03/2020.
- [28] Locker, Anatol. *2020 Best 3D Printer Slicer Software*. All3DP, 2020. Disponível em: <<https://all3dp.com/1/best-3d-slicer-software-3d-printer/>>. Data de acesso: 17/3/2020.
- [29] Ooi, Tian. *3D Printing Supports: 3 Easy Steps to Success*. All3DP, 2018. Disponível em: <<https://all3dp.com/2/3d-printing-supports-guide-all-you-need-to-know/>>. Data de acesso: 17/03/2020.
- [30] Goldschmidt, Benjamin. *The Best Cura Infill Pattern (for Your Needs)*. All3DP, 2020. (Disponível em: <https://all3dp.com/2/cura-infill-patterns-all-you-need-to-know/>). Data de acesso: Access Date.
- [31] Chavan, Abhimanyu. *FDM 3D Printing Post-Processing: An Overview for Beginners*. All3DP, 2015. Disponível em: <<https://all3dp.com/2/fdm-3d-printing-post-processing-an-overview-for-beginners/>>. Data de acesso: 08/04/2020.
- [32] Ahn, Daekeon; Kim, Hochan; Lee, Seokhee. *Fabrication direction optimization to minimize post-machining in layered manufacturing*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 47, 2007/03/01/, p. 593-606. 2007.
- [33] Hartmann, Timo; Gao, Ju; Fischer, Martin. *Areas of application for 3D and 4D models on construction projects*. Journal of Construction Engineering and management, Vol. 134, p. 776-785. 2008.
- [34] Berman, Barry. *3-D printing: The new industrial revolution*. Business Horizons, Vol. 55, 2012/03/01/, p. 155-162. 2012.
- [35] Hendriks, Drew. *3D Printing Is Already Changing Health Care*. Harvard Business Review, 2016. Disponível em: <<https://hbr.org/2016/03/3d-printing-is-already-changing-health-care>>. Data de acesso: 09/04/2020.

- [36] Lopes, Gonçalo Teixeira Ferreira. *Exploração das Possibilidades da Impressão 3D na Construção*. Dissertação de Mestrado Integrado. Departamento de Construções Cívicas. FEUP, Porto, Portugal. 2016.
- [37] 3D Printed Architecture: Complex Models with a Large 3D Printer (Disponível em: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=18487>). Data de acesso: 10/04/2020.
- [38] Paolini, Alexander; Kollmannsberger, Stefan; Rank, Ernst. *Additive manufacturing in construction: A review on processes, applications, and digital planning methods*. Additive Manufacturing, Vol. 30, 2019/12/01/, p. 100-894. 2019.
- [39] Gibson, Ian; Kvan, Thomas; Ming, Ling Wai. *Rapid prototyping for architectural models*. Rapid prototyping journal, 2002.
- [40] Pacheco, Adriano. *3 indícios que o uso da impressora 3D na construção civil brasileira é iminente*. 2017. Disponível em: <<https://maisengenharia.altoqi.com.br/estrutural/impressora-3d-na-construcao-civil-brasileira/>>. Data de acesso: 11/04/2020.
- [41] 5.Reasons to 3D Print Metal Parts: Building the Case (Disponível em: <https://www.materialise.com/en/manufacturing/5-reasons-to-3d-print-metal-parts>). Data de acesso: 10/04/2020.
- [42] Buchanan, C.; Gardner, L. *Metal 3D printing in construction: A review of methods, research, applications, opportunities and challenges*. Engineering Structures, Vol. 180, 2019/02/01/, p. 332-348. 2019.
- [43] Additive Manufacturing - Design method for critical structural steel elements (Disponível em: <https://www.arup.com/projects/additive-manufacturing>). Data de acesso: 14/03/2020.
- [44] Mok, Kimberley. *3D printed terracotta brick tower explores robotics in architecture*. treehugger, 2017. Disponível em: <<https://www.treehugger.com/sustainable-product-design/3d-printed-terracotta-brick-tower-university-hong-kong.html>>. Data de acesso: 14/03/2020.
- [45] Kwok, Roberta. *3D Printed Bricks*. Anthropocene, 2016. Disponível em: <<https://anthropocenemagazine.org/2016/09/3d-printed-bricks/>>. Data de acesso: 14/03/2020.
- [46] Chiusoli, Alberto. *3D printed earth wall with embedded staircase*. 3D WASP, 2019. Disponível em: <<https://www.3dwasp.com/en/3d-printed-wall/>>. Data de acesso: 14/03/2020.
- [47] Saunders, Sarah. *BigRep and NOWLAB Show Off Green Thumb with 3D Printed Green Wall Prototype*. 3Dprint.com, 2019. Disponível em: <<https://3dprint.com/247187/bigrep-nowlab-3d-printed-green-wall-prototype/>>. Data de acesso: 15/03/2020.
- [48] Castanheira, Ana Teresa Gaspar. *Impressão 3D de estruturas para isolamento térmico*. Dissertação de Mestrado Integrado. Departamento de Engenharia Geográfica, Geofísica e Energia. FCUP, Lisboa, Portugal. 2016.
- [49] Mimicking nature's cellular architectures via 3D printing (Disponível em: <https://wyss.harvard.edu/news/mimicking-natures-cellular-architectures-via-3d-printing/>). Data de acesso: 15/03/2020.
- [50] Criadas com impressão 3D espumas para isolamento a partir de cortiça. (Disponível em: <https://www.publico.pt/2019/10/14/p3/noticia/criadas-impressao-3d-espumas-isolamento-partir-cortica-1889907>). Data de acesso: 15/03/20.

- [51] Xu, Jie; Ding, Lieyun; Love, Peter E. D. *Digital reproduction of historical building ornamental components: From 3D scanning to 3D printing*. Automation in Construction, Vol. 76, 2017/04/01/, p. 85-96. 2017.
- [52] Sauders, Sarah. *New York Architecture Firm Uses 3D Printing to Create Beautiful Concrete Molds for Building Restoration*. 3Dprint.com, 2018. Disponível em: <<https://3dprint.com/214974/edg-3d-printed-concrete-molds/>>. Data de acesso: 18/03/2020.
- [53] 3D Printing Concrete Casting Moulds for Construction (Disponível em: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=18488>). Data de acesso: 19/03/2020.
- [54] 3D Printed House vs Prefabricated Home (Disponível em: <https://www.treatstock.com/blog/3D-printed-house-vs-Prefabricated-home>). Data de acesso: 19/03/2020.
- [55] Haus.me Launches a Sustainable 3D-Printed Prefab Home That Combines Autonomous With Off-the-grid Capabilities (Disponível em: <https://techstartups.com/2019/10/18/haus-launches-sustainable-3d-printed-prefab-home-combines-autonomous-off-grid-capabilities/>). Data de acesso: 19/03/2020.
- [56] Khoshnevis, Behrokh. *Automated construction by contour crafting—related robotics and information technologies*. Automation in Construction, Vol. 13, 5-19. 2004.
- [57] Gaget, Lucie. *3D printing for construction: What is Contour Crafting?* Sculpteo, 2018. Disponível em: <<https://www.sculpteo.com/blog/2018/06/27/3d-printing-for-construction-what-is-contour-crafting/>>. Data de acesso: 04/04/2020.
- [58] Malaeb, Zeina; Hachem, Hussein; Tourbah, Adel; Maalouf, Toufic; El Zarwi, Nader; Hamzeh, Farook. *3D concrete printing: machine and mix design*. International Journal of Civil Engineering, Vol. 6, p. 14-22. 2015.
- [59] V., Carlota. *3D Printed Houses: All the Completed Projects on the Market*. 3Dnatives, 2020a. Disponível em: <<https://www.3dnatives.com/en/3d-printed-houses-market-250220204/>>. Data de acesso: 16/03/2020.
- [60] V., Carlota. *Winsun 3D prints isolation wards to curb coronavirus outbreak*. 3Dnatives, 2020b. Disponível em: <<https://www.3dnatives.com/en/winsun-coronavirus-260220205/>>. Data de acesso: 16/03/2020.
- [61] HELLO, WE ARE PRUSA RESEARCH! (Disponível em: <https://www.prusa3d.com/about-us/>). Data de acesso: 19/03/2020.
- [62] Josef Prusa, Martin Bach. *Basics of 3D Printing with Josef Prusa*. Prusa Research Praga, 2019.
- [63] Prusa, Joseph. *MATERIAL GUIDE*. Prusa Research, 2020b. Disponível em: <<https://www.prusa3d.com/material-guides/>>. Data de acesso: 02/04/2020.
- [64] Rohringer, Sean. *2020 3D Printer Filament Buyer's Guide*. All3DP, 2020. Disponível em: <<https://all3dp.com/1/3d-printer-filament-types-3d-printing-3d-filament/>>. Data de acesso: 03/04/2020.
- [65] Chakravorty, Dibya. *3D Printing Support Structures – The Ultimate Guide*. All3DP, 2020. Disponível em: <<https://all3dp.com/1/3d-printing-support-structures/>>. Data de acesso: 02/04/2020.
- [66] Revit vs AutoCAD (Disponível em: <https://www.autodesk.com/solutions/revit-vs-autocad>). Data de acesso: 10/04/2020.

- [67] About Families (Disponível em: <https://knowledge.autodesk.com/support/revit-products/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2019/ENU/Revit-Model/files/GUID-6DDC1D52-E847-4835-8F9A-466531E5FD29-htm.html>). Data de acesso: 10/04/2020.
- [68] Cisar, Dominik. *What are perimeters good for?* PrusaPrinters, 2015. Disponível em: <https://blog.prusaprinters.org/what-are-perimeters-good-for/>. Data de acesso: 05/04/2020.
- [69] Prusa, Joseph. *3D Printing Handbook*. Prusa Research 2019.
- [70] How Desktop is Transforming Industrial 3D Printing (Disponível em: <https://amfg.ai/2019/06/04/how-desktop-is-transforming-industrial-3d-printing/?cn-reloaded=1>). Data de acesso: 11/04/2020.
- [71] Varotsis, Alkaios Bournias. *Industrial FDM vs. desktop FDM*. 3D Hubs, Disponível em: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/industrial-fdm-vs-desktop-fdm/>. Data de acesso: 11/04/2020.
- [72] Sathish, T.; Vijayakumar, M. D.; Krishnan Ayyangar, Anshumaan. *Design and Fabrication of Industrial Components Using 3D Printing*. Materials Today: Proceedings, Vol. 5, 2018/01/01, p. 14489-14498. 2018.
- [73] Salunkhe, Ashwini. *General overview of Lean Management in Construction Industry*. Vol. 5, 07/04/2018, 1999-2004. 2018.
- [74] Correia, Joana. *Dimensionamento de cofragens para estruturas de betão armado*. Dissertação de Mestrado. Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal. 2008.
- [75] Brian Torneiro, Ricardo Dias, Tânia Henriques, Sara Alves, Pedro Duarte. *Espaçadores para armaduras de betão armado - Aplicação da especificação LNEC E 469-2006 aos materiais*. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa. Lisboa, Portugal. (Disponível em: https://ricardomigueldias.weebly.com/uploads/1/4/0/9/14094985/trabalho_teorico-grupo_4.pdf). Data de acesso: 14/04/2020.
- [76] *Espaçadores para armaduras de betão armado*. Especificação LNEC, LNEC, Lisboa. 2006.
- [77] Ribeiro Tiago José, Teixeira. *Processos de construção e fiscalização de obras portuárias*. Porto, 2011.
- [78] Cogumelo de Proteção em Plástico Vermelho (Disponível em: <https://www.cls.pt/cogumelo-de-protecao-em-plastico-vermelho-1105001>). Data de acesso: 16/04/2020.
- [79] Produtos Plásticos (Disponível em: <https://www.sival2.pt/index.php?id=5&aid=1&fid=2&lang=PT>). Data de acesso: 16/04/2020.
- [80] Pereira, Marco. *Análise Técnico-Económica dos Diferentes Tipos de Tubagens e Acessórios Utilizados nas Instalações Prediais de Água e Esgotos* Dissertação de Mestrado Integrado. Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, Portugal. 2011.
- [81] Moura, João. *Banco de ensaios de perdas de carga em escoamento incompressível*. Dissertação de Mestrado. Técnico de Lisboa, Lisboa, Portugal. 2014.
- [82] Fernandes, Ana. *Habituação (Coletiva) Modular Pré-Fabricada*. Dissertação de Mestrado. Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal. 2009.
- [83] Martins, Hélder Ricardo Correia Tavares. *Resistência ao Vento de Caixilharias de Alumínio - Comparação entre Simulação Numéricas e Caracterização Experimental*. Dissertação de Mestrado Integrado. Universidade do Porto, Porto, Portugal. 2010.

- [84] Caixilhos interiores - Scigno (Disponível em: https://www.archiproducts.com/pt/produtos/scigno/caixilho-para-porta-telescopica-surprise_16509). Data de acesso: 18/04/2020.
- [85] Cabine de duche - BASIC PLUS 100X70 (Disponível em: https://www.leroymerlin.pt/Produtos/Casa-de-banho/Cabines-de-duce/Cabines-retangulares/WPR_REF_19921482). Data de acesso: 18/04/2020.
- [86] Roda macas em Acrovyn (Disponível em: <https://www.c-sgroup.pt/products/acrovyn-wall-protection/crashrails/acrovyn/>). Data de acesso: 19/04/2020.
- [87] Tudo sobre rodapés (Disponível em: <https://www.vivadecora.com.br/pro/design-de-interiores/tipos-de-rodape/>). Data de acesso: 19/04/2020.
- [88] Proteção de parede, Lambris, Rodamacas e Sistema de corrimão (Disponível em: <https://www.cortartec.eu/rodamacas>). Data de acesso: 19/04/2020.
- [89] Sobre a modelagem de objetos 3D (Disponível em: <https://knowledge.autodesk.com/pt-br/support/autocad/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2018/PTB/AutoCAD-Core/files/GUID-9DACE807-BC9D-4357-B47E-C6199F6AF1A2-htm.html>). Data de acesso: 16/06/2020.
- [90] Sobre como criar sólidos e superfícies partindo de geometria 2D (Disponível em: <https://knowledge.autodesk.com/pt-br/support/autocad/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2018/PTB/AutoCAD-Core/files/GUID-44020C98-A94C-42C9-976B-D032FEF014E6-htm.html>). Data de acesso: 16/06/2020.
- [91] Sobre as restrições (Disponível em: <https://knowledge.autodesk.com/pt-br/support/revit-products/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2019/PTB/Revit-Model/files/GUID-91CBCCF3-66D1-496B-80B3-D893065D1A50-htm.html>). Data de acesso:
- [92] Vistas de projeto (Disponível em: <https://knowledge.autodesk.com/pt-br/support/revit-products/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2019/PTB/Revit-DocumentPresent/files/GUID-8B1294DC-617E-48F9-AC18-A998F43384C9-htm.html>). Data de acesso: 16/06/2020.
- [93] Famílias - Habilidade essencial (Disponível em: <https://help.autodesk.com/view/RVT/2019/PTB/?guid=GUID-7AEC5D66-C2E0-40E2-9504-3CC13781B87A>). Data de acesso: 17/06/2020.
- [94] Concrete rebar distancer (Disponível em: <https://www.thingiverse.com/thing:3132598>). Data de acesso: 05/05/2020.
- [95] Concrete Mesh Chair (Disponível em: <https://www.thingiverse.com/thing:458987>). Data de acesso: 05/05/2020.
- [96] Pipe fittings 20 mm (Disponível em: <https://www.thingiverse.com/thing:891793>). Data de acesso: 06/05/2020.
- [97] Pipe Fittings (Disponível em: <https://www.thingiverse.com/thing:4375139>). Data de acesso: 06/05/2020.
- [98] Ionic Essence Framed 2 Dr Quadrant (Disponível em: <https://www.bimstore.co/products/ionic-essence-framed-2-dr-quadrant>). Data de acesso: 08/05/2020.
- [99] Sliding door bolt print fully assembled (Disponível em: <https://www.thingiverse.com/thing:1596180>). Data de acesso: 08/05/2020.
- [100] European Construction Sector Observatory. *Integrating digital innovations in the construction sector - The case of 3D Printing and Drones in construction*. SERIES, T. P., European Comission, 2019.

ANEXO

A: DESENHOS TÉCNICOS

A1: COGUMELOS DE PROTEÇÃO

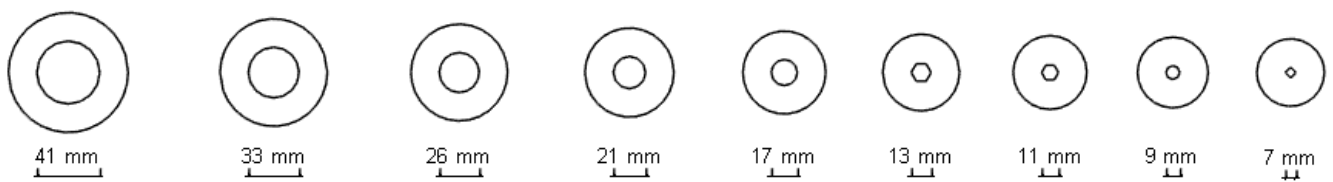


Figura 106 – Vista em planta dos modelos CAD dos Cogumelos de Proteção

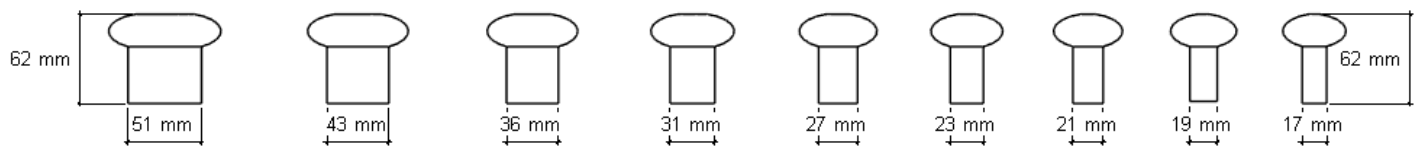


Figura 107 – Vista em alçado dos modelos CAD dos Cogumelos de Proteção

A2: ESPAÇADORES DE COFRAGENS

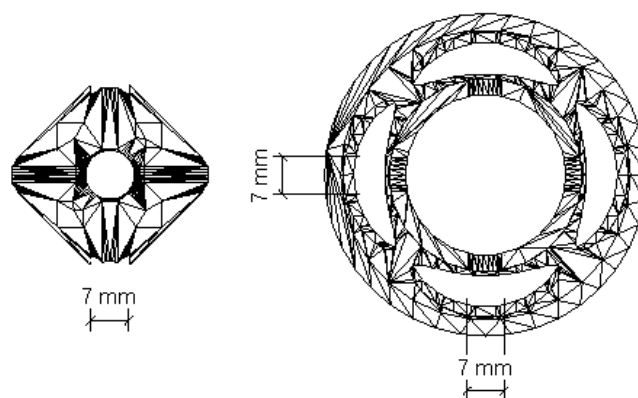


Figura 108 – Vista em planta dos modelos CAD dos Espaçadores

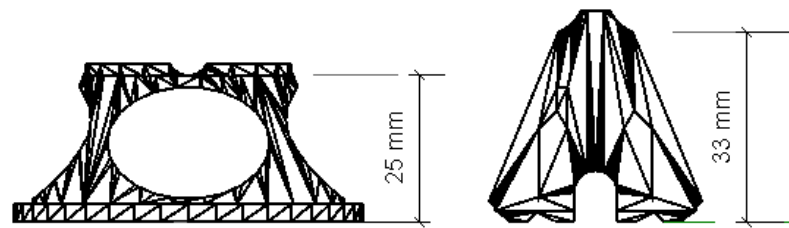


Figura 109 – Vista em alçado dos modelos CAD dos Espaçadores

A3: JUNTA DE UNIÃO E TUBO

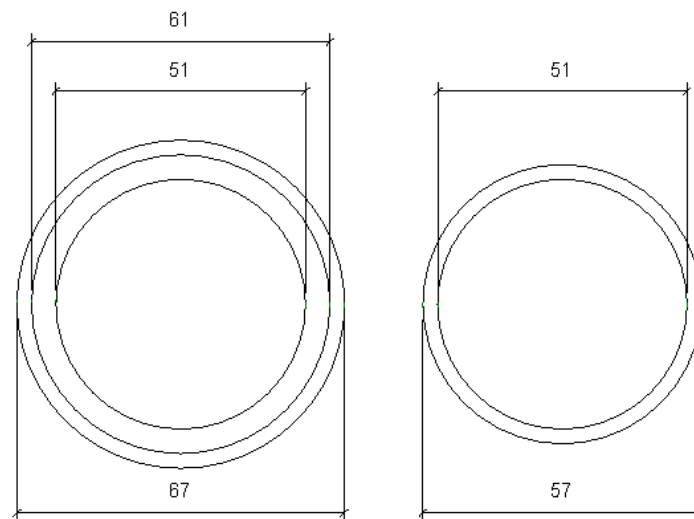


Figura 110 – Vista em planta dos modelos CAD da Junta de União e Tubo

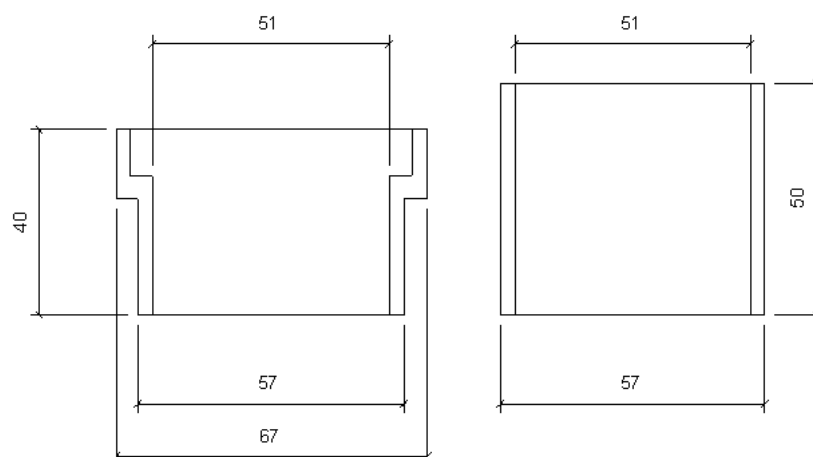


Figura 111 – Vista em alçado dos modelos CAD da Junta de União e Tubo

A4: CANTOS DE RODAPÉS

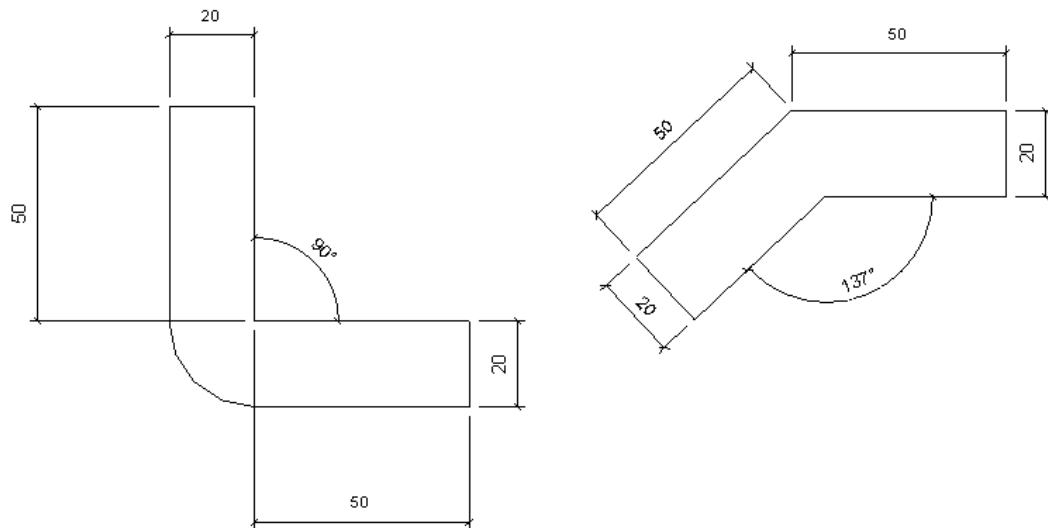


Figura 112 – Vista em planta dos modelos CAD dos Cantos de Rodapés

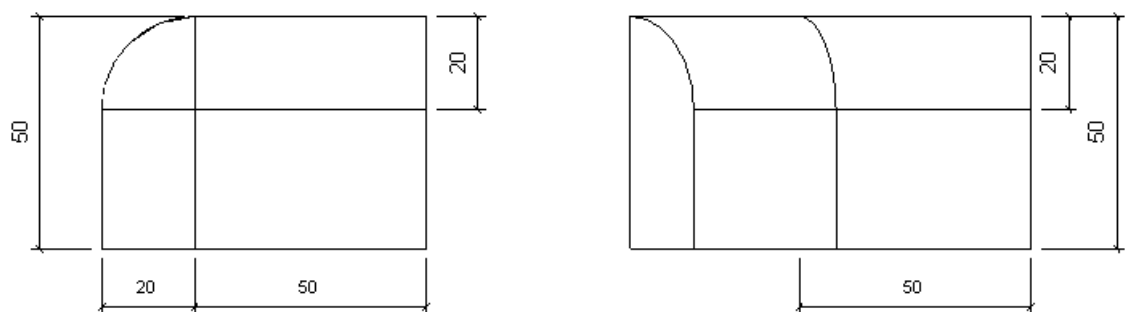


Figura 113 – Vista em alçado dos modelos CAD dos Cantos de Rodapés

