

A tecnologia de impressão 3D aplicada em processos de projeto de Arquitetura e Engenharia

<https://doi.org/10.21814/uminho.ed.32.6>

Daniel Moutinho¹, Pedro Ferreira¹

¹ TPF – Consultores de Engenharia e Arquitetura, S.A., Lisboa

Resumo

O uso de maquetes como ferramenta integrada no processo de desenvolvimento de projetos é muito comum entre os arquitetos, quer por estar enraizada na sua formação académica, quer pela constatação das vantagens no desenvolvimento e comunicação do projeto entre os diversos intervenientes no projeto. Contudo, na equipa de arquitetura da TPF – CONSULTORES DE ENGENHARIA E ARQUITETURA, S. A. por razões inerentes à gestão do tempo e custos do projeto, constata-se uma grande dificuldade em alocar meios humanos para a realização de maquetes de estudo. Por outro lado, embora se considerem insubstituíveis, têm-se optado por outras ferramentas de comunicação com relação custo/benefício mais imediata (imagens foto realistas).

Dentro da realidade multidisciplinar da empresa, o uso de processos de prototipagem é menos frequente nas áreas disciplinares da engenharia de natureza infraestrutural. Por oposição, à semelhança dos arquitetos, os engenheiros de Geotecnia encontram grandes vantagens na utilização de maquetes para oferecer uma perspetiva mais clara das soluções de projeto no contexto topográfico intervencionado, podendo ser utilizada em contexto de projeto, obra e como auxiliar de planeamento.

De um modo consensual, percebe-se que as maquetes beneficiam a compreensão e qualidade dos projetos. De modo a se ultrapassarem as barreiras associadas ao seu custo, e disponibilização de recursos humanos, entendeu-se que os modelos BIM do projeto poderiam potenciar a realização de maquetes recorrendo a impressoras 3D. Neste sentido, desenvolveu-se o presente artigo com base em casos de estudo concretos, nos quais se explica o *workflow* utilizado, bem como os custos associados à sua realização comparados com o processo de prototipagem manual.

1. Introdução

Este artigo procura sintetizar a implementação de processos de maquetização associados ao desenvolvimento de projeto na empresa TPF – CONSULTORES DE ENGENHARIA E ARQUITETURA, S. A. Com base em exemplos de projeto de arquitetura e engenharia pretende-se evidenciar as principais motivações para a implementação desta ferramenta, os obstáculos encontrados e o modo como se conseguiu viabilizar o objetivo com base na metodologia BIM e a tecnologia de impressão 3D.

2. A importância da maquete enquadrada nos processos de projeto

Os processos que envolvem o projeto são variados e decorrem do uso de várias ferramentas, como o computador, o esboço e a maquete. A propósito destes instrumentos, o Arq.º Álvaro Siza Vieira [1] refere que são complementares, considerando que falhando um, há uma perda, e que é necessário funcionar com as possibilidades instrumentais que existem ao nosso dispor. Cada uma das ferramentas é incompleta se não for complementada com outros métodos.

O Arq.º Sou Fujimoto [2], no âmbito da sua prática, realça a importância do uso de meios simples, como palavras, esboços, maquetes e discussões em equipa no processo de exteriorização das suas ideias. A propósito da relação entre desenhos e maquetes, refere que caminham lado a lado, e que o processo de transformar modelos vagos e conceptuais, nascidos de esboços e palavras, em algo mais substancial, como maquetes tridimensionais, mais exatas e definitivas, é muito emocionante.

As ferramentas e a tecnologia existente têm como função diminuir a distância entre o que está na mente do projetista e a realidade, gerando uma forma visível de uma realidade interna [3] permitindo a discussão daquilo que antes era só uma ideia, a fim de dar consistência e integridade ao projeto [4].

No processo de desenvolvimento do projeto arquitetónico, entende-se que a maquete é absolutamente essencial como elemento de investigação, pesquisa e experimentação, de modo a refinar aspetos relacionados com validação conceitos, formas, a sua proporção, escala e modulação. Embora este instrumento se revele vantajoso como síntese, com uma componente de comunicação da solução final do projeto, a nossa experiência de projeto permite concluir que a sua maior vantagem reside no facto de ser implementado no desenvolvimento e não apenas no final do projeto.

3. Barreiras à implementação de processos de maquetização na empresa

No entendimento da equipa de projeto, embora seja evidente a importância que esta ferramenta desempenha, como complemento às demais utilizadas, a sua implemen-

tação, caracterizada por processos quase exclusivamente artesanais, revela-se cada vez mais difícil devido, sobretudo, às seguintes barreiras:

Indisponibilidade dos colaboradores: A dimensão das equipas de projeto associada ao número de projetos em curso, nem sempre permite que um colaborador, ou vários, se dedique a tempo inteiro, mesmo que pontualmente, durante alguns dias ou semanas ao desenvolvimento de maquetes;

Custos elevados: Tendo a consciência do custo de cada colaborador, o seu tempo deve ser alocado do modo mais eficiente possível. Este fator associado aos honorários de projeto nem sempre permite o enquadramento de maquetes de estudo no desenvolvimento do projeto;

Prazos muito curtos: O mercado é muito competitivo. Tendencialmente o tempo de projeto é muito curto, o que implica uma grande disciplina no modo como o tempo é gerido. A fase de Estudo Prévio, mais exploratória e experimental, pode variar entre 2 semanas e 2 meses, dependendo da escala do projeto. Usar a maquete como ferramenta de investigação, pesquisa e experimentação é um desafio cada vez mais arriscado, que pode implicar muito trabalho extraordinário.

Independentemente das barreiras identificadas, quando existe a oportunidade de se desenvolverem maquetes de estudo, entende-se de modo unânime, que o projeto é claramente beneficiado.

4. Metodologia BIM e Impressão 3d: a oportunidade de implementação

A tecnologia de impressão 3d, designada por FFF – *Fused Filament Fabrication*, também conhecida como FDM – *Fused Deposition Modeling*, existe desde os anos 50 do séc. XX, e tem-se vindo a tornar acessível desde o início do séc. XXI com a criação da impressora auto-replicante (projeto RepRap) [5] [6]. Atualmente esta tecnologia é muito acessível, principalmente as impressoras que são montadas pelo próprio utilizador, como é o caso das *Creatly Ender-3* [7], usada no desenvolvimento das maquetes no âmbito do presente artigo. A *Ender-3* é considerada uma impressora 3D de baixo custo que em 2018, na altura do seu lançamento, se definiu como a referência no mercado para este tipo de impressoras.

Esta ferramenta, indissociável da modelação digital, permite a concretização de modelos, protótipos, ou maquetes com o rigor da geometria modelada. Como o modelo digital é um subproduto inerente à metodologia BIM, utilizada no desenvolvimento de projeto, não há a necessidade de se gerarem modelos específicos para impressão. O facto de nos servirmos do modelo de projeto para impressão permitiu uma implementação simples e rápida da tecnologia.

A possibilidade de impressão contínua, apenas condicionada pela quantidade de filamento disponível e pelo limite máximo de impressão no eixo Z, permite que o

equipamento possa trabalhar ininterruptamente durante o dia e noite, ao contrário do processo artesanal, no qual nos parece sensato considerar apenas 8 horas diárias.

A desvantagem que realçamos nas maquetes de estudo impressas, em comparação com o processo tradicional, é a dificuldade de se realizarem manualmente alterações. Como os objetos impressos são monolíticos, em materiais como PLA (*Polylactic acid*) ou PET (*Polyethylene terephthalate*) (entre outros) a sua rigidez não permite que se “corte e cole” como o cartão ou poliestireno nas maquetes tradicionais.

5. Breve explicação do processo de impressão 3D

Em primeiro lugar, o modelo virtual utilizado como base para a realização da impressão pode ser realizado através de softwares como o *Fusion 360*, o *Revit*, ou o *AutoCAD* a partir de desenhos em 2D ou desenvolvidos diretamente em 3D. Dependendo do modelo e do *software* utilizado, poderão ser executados os ajustes como a divisão do modelo, gerando as várias peças que o vão compor e que podem ser encaixadas ou coladas. Esta divisão resulta da necessidade de garantir que as dimensões dessas peças são compatíveis com a impressora utilizada, ou que as especificações exigidas para a representação do modelo final a imprimir são seguidas.

Em segundo lugar é realizada a exportação destes elementos para um formato mais versátil, um desses formatos é o STL (*Standard Tessellation Language*). Este é o formato standard atualmente e é um dos formatos mais utilizados para descrever de forma simples um objeto tridimensional.

Depois de convertidos estes objetos em superfícies que são representadas pelas coordenadas dos vértices dos vários triângulos, é necessário instruir a impressora do que tem que fazer para conseguir imprimir o nosso modelo. As impressoras 3D geralmente interpretam a linguagem de programação *G-code*, que é atualmente a linguagem padrão para máquinas CNC (Comando Numérico Computadorizado). Esta linguagem permite controlar, no caso das impressoras 3D FDM, a localização da cabeça de impressão, a aceleração, a velocidade, as temperaturas da base e da extrusora. Contudo, estes são apenas alguns dos parâmetros que têm de, ou que podem, ser configurados e passados para a impressora 3D em forma de instruções nesta linguagem. Para que isso seja possível, de uma forma simples e interpretável pelo Homem, são utilizados *softwares* conhecidos como *Slicers* (Figura 1), estes *softwares* utilizam algoritmos que permitem, de uma forma bastante simples e eficiente, converter o nosso modelo em *G-code*.

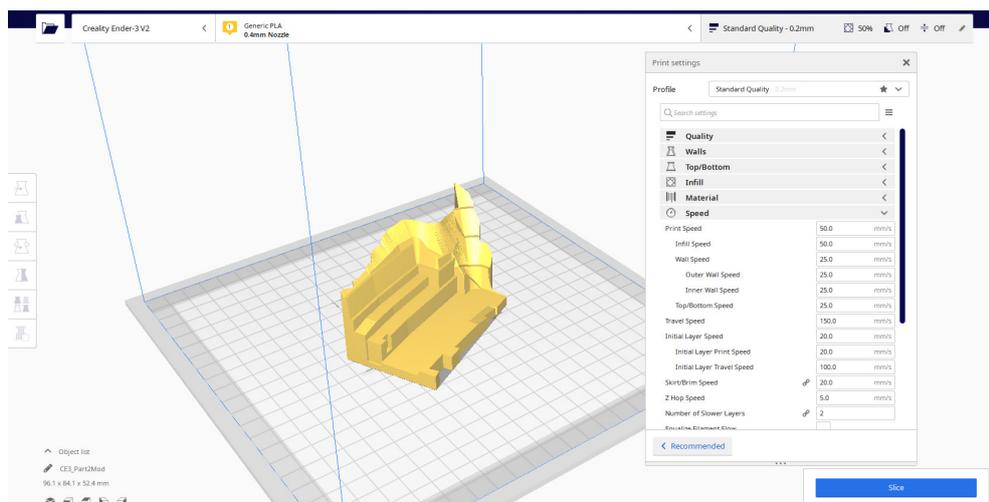


Figura 1
Ambiente de trabalho
de um Slicer – software
Cura.

A preparação num *Slicer* começa pela definição da posição, da escala, ou até do número de cópias que se quer do modelo e pela verificação de que todo o modelo, ou modelos, a imprimir cabem na impressora e que podem ser impressos de uma única vez. Este tipo de software normalmente apresenta no ambiente de trabalho uma base que deve corresponder às dimensões, largura e comprimento, da base real da impressora e uma altura correspondente à máxima que a cabeça de impressão pode atingir. Este *interface* permite perceber se é necessário ajustar as dimensões de cada peça no software de modelação antes realizar a impressão.

De seguida são definidos os parâmetros para a impressão de acordo com as capacidades da impressora e do tipo de filamento a utilizar. Esta é talvez a parte do processo que requer um maior conhecimento e esforço, sem contar com a do processo criativo e de modelação. Esta exigência ao nível do conhecimento sobre a parametrização para determinada impressora deve-se ao fato de existirem muitos tipos e marcas de filamentos com as mais variadas características e qualidades. Para além disso, existe uma multitude de modelos de impressoras 3D, e, por vezes o mesmo modelo pode ter variações em relação aos componentes que estão a ser utilizados e nesse caso os resultados finais podem ser diferentes dos esperados, caso isso não seja tido em consideração.

Em suma, é necessário conhecer bem a impressora, os filamentos que vamos utilizar, as condições de humidade e temperatura ambiente, entre outros. Por vezes, a aquisição do conhecimento necessário para se conseguirem boas impressões passa pelo método de tentativa/erro.

Alguns dos principais parâmetros a definir num *Slicer* antes de imprimir são:

- Dimensão do *Nozzle* (bico de impressão);
- A altura das camadas;
- A espessura das paredes;
- A densidade do preenchimento da peça e o tipo de padrão utilizado;

- A temperatura a que a extrusão é realizada;
- A temperatura da base, caso seja aquecida;
- A velocidade de impressão;
- A necessidade de incluir peças de suporte temporárias para possibilitar a impressão de certas partes do modelo;
- A forma de adesão da peça à base;

Estes parâmetros são apenas alguns dos que podem ser definidos antes de se fatiar o modelo. O *software Cura* permite ver as camadas e fazer uma previsão da quantidade de material que será consumido na impressão. Este *software* permite ainda verificar se as partes da peça precisam de algum tipo de suporte. Se tudo estiver correto, é realizada a exportação do modelo e dos parâmetros para o *G-code*. A partir deste momento, resta apenas a calibração da base da impressora, o pré-aquecimento e a alimentação da impressora com o filamento escolhido.

6. Impressão 3D na Arquitetura

Para explicitar o modo como a impressão 3D tem sido utilizada para a realização de maquetes de estudo na disciplina de Arquitetura, escolhemos 3 projetos desenvolvidos em BIM (*Revit*), de diferentes tipologias e graus de complexidade. São todas maquetes consideradas “de estudo”, umas de caráter mais estrutural e outras mais conceituais.

De acordo com a nossa experiência, as principais condicionantes a ter em conta para desenvolver maquetes recorrendo a esta tecnologia são: as características geométricas dos edifícios; o propósito da maquete; e as limitações dimensionais de impressão dos equipamentos nos eixos X, Y e Z. Estas condicionantes fornecem informações importantes sobre o modo como as vistas tridimensionais do modelo BIM devem ser preparadas de modo a mostrar o estritamente necessário.

A complexidade dos projetos e a escala escolhida para a sua representação física nem sempre permite que as maquetes sejam impressas de uma só vez. Por essa razão, todos os exemplos apresentados são compostos por mais do que uma peça.

6.1. Maquete 1

Esta maquete representa parcialmente o projeto de um hotel na fase de Estudo Prévio, composto por 2 pisos abaixo do solo e 7 acima do solo. Foi concebida com o propósito de estudar a espacialidade e interação das dependências do piso térreo, com pé direito duplo, áreas exteriores e pisos superiores.

A maquete foi impressa à escala 1/200, em PLA branco, a partir do modelo BIM de projeto em *Revit 2020*. No âmbito da preparação do modelo virtual para impressão, apenas se mantiveram visíveis as paredes, pilares, lajes e escadas. Cada vista 3D foi confinada com a ferramenta *Section Box* de modo a mostrar apenas o piso a ou a par-

te do piso a imprimir. No caso do piso térreo, foi necessário concebê-lo em 4 peças, por se tratar da área maior.

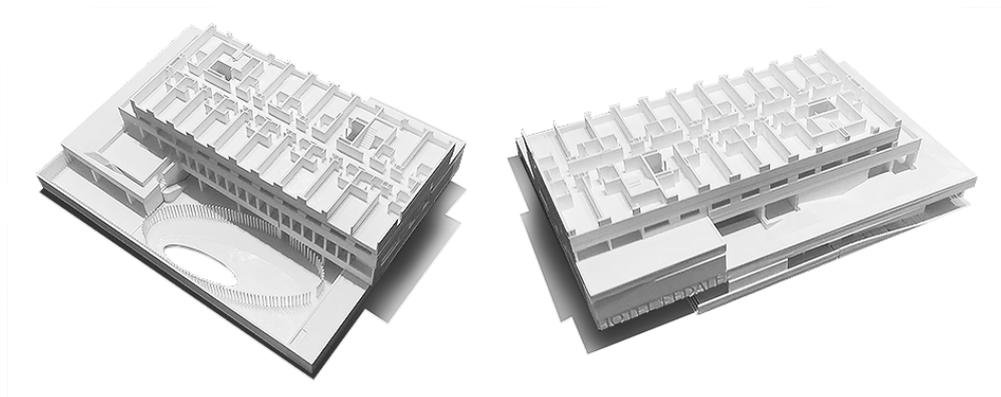


Figura 2
Fotografias da
maquete 1.

6.2. Maquete 2

Este modelo refere-se ao projeto do edifício de uma Aerogare na fase de Estudo Prévio, representado à escala 1/200. De forma paralelepipedica, é composto por 2 pisos acima do solo, envolvido por uma pele em chapa metálica perfurada que permite ensombramento das superfícies envidraçadas. A maquete foi concebida com o propósito de auxiliar no desenho da espacialidade interior, caracterizada por espaços com duplo pé-direito nos quais a estrutura metálica tem grande protagonismo arquitetónico. Permitiu também ajudar o cliente a perceber o projeto.

À semelhança da maquete anterior, esta foi também concebida por pisos, à escala 1/200, em PLA branco, a partir do modelo BIM de projeto em *Revit 2020*. No entanto, a especificidade da fachada, que funciona como uma espécie de invólucro do edifício, precisou de ser impressa como uma peça à parte que permitisse a integridade do conjunto, mas que ao mesmo tempo permitisse a sua desmontagem. A estrutura da cobertura assim como a cobertura foram também impressas como peças separadas. A preparação das vistas do modelo BIM para exportação STL decorreu de acordo com o explicado para a Maquete 1.



Figura 3
Fotografias da
maquete 2.

6.3. Maquete 3

Esta maquete foi realizada no âmbito do projeto de remodelação de interiores para instalação da sede de uma empresa na fase de Estudo Prévio. Refere-se apenas ao piso de um edifício de escritórios que foi objeto de intervenção. Para além de evidenciar o espaço disponível, pretendia-se representar a estrutura de pilares e vigas que se constituíram como uma forte condicionante de projeto.

Nesta maquete à escala 1:200, ao contrário das maquetes anteriores, usaram-se 3 tipos de filamento: PLA branco, PLA com partículas de madeira e PET preto. Utilizou-se o modelo BIM de projeto em *Revit 2021*. Como se pretendia estudar vários cenários conceptuais de organização interior, esta maquete tem um carácter mais experimental que as anteriores. Todos elementos confinantes do piso existente foram impressos à parte, em PLA branco, funcionando como invólucro, assim como a estrutura de pilares e vigas. As peças referentes às diferentes soluções de layout foram impressas em PLA e PET de cor diferente para reforçar o contraste entre a solução proposta e o seu invólucro.



Figura 4
Fotografia da maquete 3
e das suas variantes.

7. Impressão 3D na Engenharia

Para além da Arquitetura, a disciplina que procurou explorar esta técnica de prototipagem automática foi a Geotecnia. No decorrer de uma formação de *Civil 3D*, concebida e ministrada internamente pela TPF Consultores aos seus colaboradores, surgiu a ideia de mostrar aos seus participantes a topografia que estavam a manipular recorrendo a uma impressora 3D de filamento (FDM). O projeto que foi utilizado como referência detalhava a forma como seria executada a escavação e a contenção periférica de um recinto para a construção de um edifício na Madeira com uma área total de aproximadamente 5 000 m².

Os formandos modelaram uma escavação de geometria complexa, que foi depois exportada como um sólido utilizando as ferramentas disponíveis no *Civil 3D*. Em primeiro lugar, das superfícies TIN que foram criadas no *Civil 3D* foram extraídos os sólidos necessários aplicando uma determinada profundidade de forma a permitir o seu suporte no tabuleiro da impressora. Em segundo lugar, estes sólidos foram preparados para que o modelo tivesse dimensões que a impressora pudesse imprimir, ou seja, teve que ser dividido em várias partes.

Esta maquete, definida à escala 1:1000, que inclui o terreno natural e a escavação associada, levou aproximadamente 40 horas a imprimir, numa impressora com uma dimensão de base de 20 x 20 cm (Figura 5).

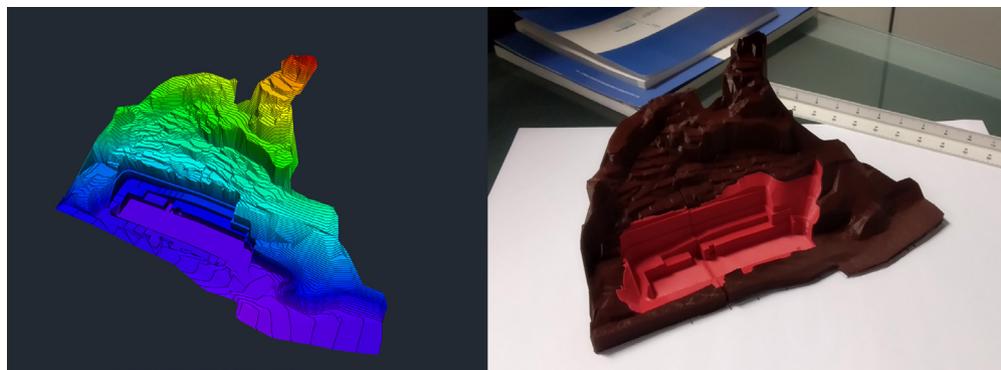


Figura 5
Modelo TIN e impressão 3D do terreno natural e da escavação.

Entre as vantagens mais evidentes para a disciplina de geotecnia, destacamos a facilidade de criar, de modo expedito, um modelo físico para auxiliar o projetista a comunicar a sua visão, tanto para a fase de projeto como para a fase de obra, para esclarecer dúvidas e servir de suporte à gestão de recursos *in loco*.

8. Custo

Com base numa folha de cálculo disponibilizada pela *Bitlab* [7] foi feito um estudo comparativo dos custos associados às maquetes realizadas através da impressão 3D vs processo tradicional.

Maquete 1	ARQ	Maquete 2	ARQ	Maquete 3	ARQ	Maquete 4	GEO
Custo impressão 3D		Custo impressão 3D		Custo impressão 3D		Custo impressão 3D	
Massa da peça [kg]	0,4	Massa da peça [kg]	0,32	Massa da peça [kg]	0,12	Massa da peça [kg]	0,52
Tempo de impressão [h]	35	Tempo de impressão [h]	40	Tempo de impressão [h]	15	Tempo de impressão [h]	48
Custo do material		Custo do material		Custo do material		Custo do material	
- Plástico	8,80 €	- Plástico	7,04 €	- Plástico	2,64 €	- Plástico	11,44 €
- Eletricidade	2,63 €	- Eletricidade	3,00 €	- Eletricidade	1,13 €	- Eletricidade	3,60 €
Custo do operador		Custo do operador		Custo do operador		Custo do operador	
- Preparação (1,5h)	30,00 €	- Preparação (2h)	40,00 €	- Preparação (1h)	20,00 €	- Preparação (2h)	40,00 €
- Pós-produção (2h)	40,00 €	- Pós-produção (2h)	40,00 €	- Pós-produção (2h)	40,00 €	- Pós-produção	5,00 €
Custo de falhas (10%)	8,14 €	Custo de falhas (10%)	9,00 €	Custo de falhas (10%)	6,38 €	Custo de falhas (0%)	0,00 €
Total	89,57 €	Total	99,04 €	Total	70,14 €	Total	60,04 €
Custo processo tradicional		Custo processo tradicional		Custo processo tradicional		Custo processo tradicional	
Custo do operador		Custo do operador		Custo do operador		Custo do operador	
(60h x 20€/h)	1 600,00 €	(100h x 20€/h)	2 000,00 €	(40h x 20€/h)	600,00 €	(90h x 20€/h)	1 800,00 €
Custo do material	40,00 €	Custo do material	40,00 €	Custo do material	20,00 €	Custo do material	70,00 €
Total	1 640,00 €	Total	2 040,00 €	Total	620,00 €	Total	1 870,00 €

5,5%	4,9%	11,3%	3,2%

Figura 6
Quadro de comparativo de custos entre a impressão 3D e o processo tradicional.

É possível constatar que o custo de cada maquete impressa se situa entre 3,2 e 11,3% do que custaria segundo o processo manual, como se pode verificar na figura 6. No caso da maquete mais complexa e cara – a maquete 2 – o custo aproxima-se dos 100€, que é um valor considerado residual, perfeitamente enquadrável nos

processos de projeto, mesmo nos mais exigentes do ponto de vista do controlo de custos para a empresa.

9. Conclusão

Considerava-se essencial introduzir a realização de maquetes nos processos de projeto de arquitetura. Tendo em conta os elevados custos inerentes aos processos manuais, que dificultavam, projeto após projeto, a inclusão de maquetes no processo, os modelos BIM de projeto impulsionaram a implementação do processo de impressão 3D que se revelou como a única solução que viabilizou a intenção da equipa de arquitetura. O seu reduzido custo, que ronda 5% do custo do processo tradicional, é considerado insignificante, deixando de existir barreiras para a sua realização. Deste modo passou a ser possível que este recurso fosse também utilizado com naturalidade por disciplinas da engenharia que não têm tradição de realizar maquetes, nomeadamente a Geotecnia.

Referências

- [1] Spain Arts & Culture. Álvaro Siza Vieira. Disponível em: <<https://www.spain-culture.pt/projetos-digitais/e-p-colab/alvaro-siza-vieira/>> Acesso em: 4 jan. 2022.
- [2] S. Fujimoto, Interviewee, *The centrality of sketching and modelling to his architecture*. [Entrevista]. 26 Abril 2013.
- [3] ROZESTRATEN, Artur Simões. O desenho, a modelagem e o diálogo. *Arquitextos*, São Paulo, 07.078, Vitruvius, nov. 2006. Disponível em: <<http://www.vitruvius.com.br/revistas/read/arquitextos/07.078/299>>. Acesso em 4 jan. 2022.
- [4] J. Salmaso, S. Vizioli, "O uso do modelo físico e digital nos processos de projeto da arquitetura contemporânea", Relatório Final de Atividades, São Paulo, Instituto de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, Brasil, 2012.
- [5] I. Rita, J. Rocha, A. Francisco, A. Tomé, "Processo digitais HBIM-FFF para a representação física do património – o caso de estudo do Palácio Nacional de Sintra" in: 2.º Congresso Português de Building Information Modelling (2018), Lisboa, Portugal, 2018, pp. 169-178.
- [6] The RepRap project. Disponível em: <<https://reprap.org/wiki/RepRap>> Acesso em 5 jan. 2022.
- [7] Creality3D Official Store. Disponível em: <<https://www.creality3dofficial.com/>> Acesso em 5 jan.2022.
- [8] Bitbab. "Quanto custa imprimir em 3D? Calculadora de preço para imprimir em 3D". Disponível em: <<https://bitfab.io/pt-pt/blog/quanto-custa-imprimir-em-3d/>> Acesso em 5 jan.2022.