

## IMPRESSÃO 3D COM EXTRUSÃO DE MATERIAL CIMENTÍCIO

João Teixeira<sup>1</sup>, Bárbara Rangel<sup>1,2</sup>, Jorge A. Lino<sup>1,3</sup>, Rui Neto<sup>3</sup> e Sandra Nunes<sup>2</sup>

1: Mestrado em Design Industrial e de Produto  
Faculdade de Engenharia / Faculdade de Belas Artes  
Universidade do Porto  
e-mail: up201601412@fe.up.pt

2: CONSTRUCT, Departamento de Engenharia Civil  
Faculdade de Engenharia  
Universidade do Porto  
e-mail: {brangel, snunes}@fe.up.pt

3: INEGI  
Faculdade de Engenharia  
Universidade do Porto  
e-mail: {falves, rjn}@fe.up.pt

**Palavras-chave:** Construção, Extrusão, Impressão 3D, Materiais cimentícios.

**Resumo.** *A tecnologia de impressão 3D é atualmente a tecnologia de fabricação em maior expansão a nível mundial. Ao produzir peças através da deposição incremental de material somente onde este é necessário permite, potencialmente, obter qualquer forma sem desperdício de material e sem recurso a moldes. Estes argumentos estão a transformar as mais diversas áreas como o design industrial e de produto ou a medicina. Na indústria da construção, o uso da fabricação aditiva apresenta um enorme potencial para a conceção de soluções mais adaptadas e otimizadas, promovendo conceitos de sustentabilidade, assim como de liberdade formal.*

*Nos últimos anos, têm surgido inúmeros projetos/empresas que visam implementar a impressão 3D, na construção civil, por via de extrusão de materiais cimentícios, como a Contour Crafting, BetAbram, Bruil, Wasp, entre outras. Por se dispensar o uso de cofragem, um dos aspetos críticos é o ajuste das propriedades do material no estado fresco às exigências da impressão 3D, vulgarmente designadas na literatura internacional por: "workability", "buildability" e "extrudability". Ou seja, é necessária uma consistência no estado fresco, que permita o transporte e extrusão do material, seguida de uma evolução rápida da resistência que permita a deposição de camadas sucessivas de material, sem deformação excessiva das camadas mas garantindo uma boa ligação entre elas.*

*No presente trabalho pretende-se explorar a impressão 3D, por via da extrusão, para a indústria da construção. A fase inicial do trabalho consistiu no desenvolvimento e caracterização das propriedades de diversas argamassas no estado fresco e da sua evolução ao longo das primeiras idades, tendo como objetivo identificar a argamassa ótima para o processo de impressão. Em seguida, procedeu-se ao fabrico de provetes de argamassa moldados e com recurso à impressão 3D, destinados à caracterização das propriedades mecânicas do material, no estado endurecido. Após a escolha da argamassa, foram realizados estudos formais com recurso a uma mesa giratória que resultou na impressão de um vaso.*

## 1. INTRODUÇÃO

A impressão 3D é atualmente a tecnologia de fabricação em maior expansão. Presente nas mais diversas áreas: automobilismo, aeronáutica, exploração espacial, arte, medicina e mais recentemente na construção, com o aparecimento de tecnologias de extrusão de argamassas e betões [1]. Este conceito baseado na deposição sucessiva de camadas de material, apresenta um enorme potencial para a construção em betão, eliminando a necessidade de uso de cofragem e promovendo conceitos de sustentabilidade, assim como de liberdade formal.

Nos últimos anos, inúmeros projetos promoveram o desenvolvimento desta tecnologia, começando em 2004 com o Dr. Behrokh Koshenevis criador da Contour Crafting, seguido de empresas como a Wasp, Bruil, BetAbram, CyBe e universidades como a de Loughborough e Eindhoven.

Em todos estes casos foram desenvolvidas misturas adaptadas aos sistemas de impressão utilizados, que variam em termos da estrutura da própria impressora, o método de transporte do material desde a amassadura até ao bocal de saída, tendo também alterações no modo de extrusão.

## 2. SISTEMA DE EXTRUSÃO

No presente trabalho foi utilizado um extrusor com um funcionamento semelhante ao de uma seringa. Neste sistema (Fig.1) o material é depositado no interior de um cilindro e forçado a sair pelo bocal através da pressão exercida por um pistão, acionado mecanicamente.

O corpo do extrusor (cilindro) tem capacidade para aproximadamente 5kg de material, quantidade que possibilita a impressão de provetes para ensaios mecânicos ou a impressão de pequenas peças. Junto ao bocal foram ainda instalados dois atuadores pneumáticos, que vibram o material junto à saída. O acoplamento do bocal ao extrusor é feito através de uma rosca que permite a troca de bocal com facilidade. Ao longo dos ensaios foram utilizados 3 tipos de bocais: dois de secção transversal circular, e com diâmetro de 15 e 23 mm; e um com secção transversal retangular com as dimensões de 15x35mm<sup>2</sup>.

A maior desvantagem do sistema utilizado prende-se com o controlo manual dos movimentos da mesa de impressão (2 D, na horizontal) e do movimento vertical do corpo do extrusor. A falta de automatização dificulta a repetição das condições do ensaio (velocidade de deposição, altura da deposição, tempo de deposição e geometria da camada) e tem uma grande influência na qualidade do acabamento das peças.

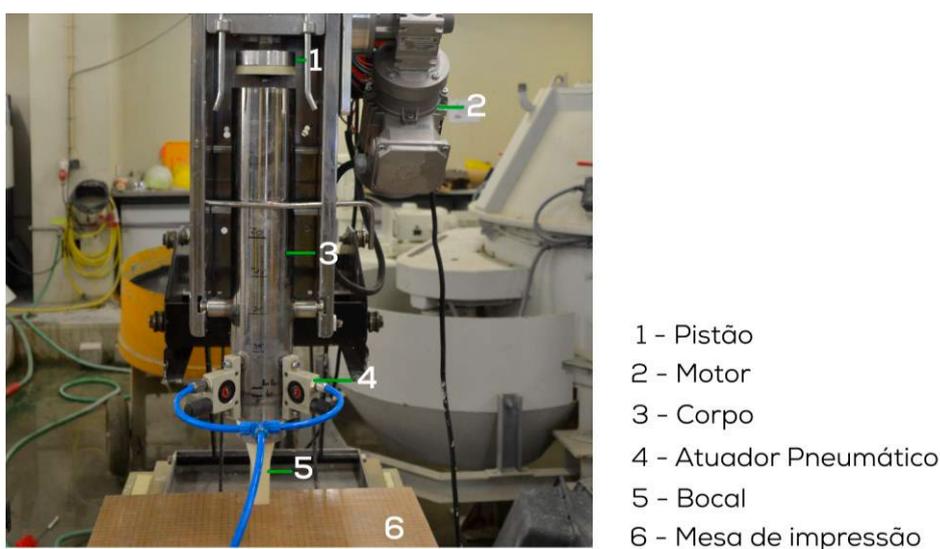


Figura 1. Principais componentes do sistema de impressão.

### 3. DESENVOLVIMENTO DO MATERIAL

#### 3.1. Requisitos de desempenho para impressão

Para além da grande durabilidade, os materiais cimentícios podem exibir resistências elevadas, no estado endurecido, e fluidez no estado fresco, propriedades que motivam o seu desenvolvimento para a inclusão em sistemas de impressão 3D [2].

Na impressão 3D a conceção do objeto é feita através da deposição sucessiva de camadas, logo o material necessita de trabalhabilidade para percorrer o caminho até ao bocal de saída do extrusor e de adquirir resistência suficiente, logo após a extrusão, para suportar o peso das camadas. Os requisitos habitualmente associados à “printability” do material são: “workability”, “buildability”, “extrudability” (Tab.1).

|                 |   |                |
|-----------------|---|----------------|
| “Workability”   | Refere-se à trabalhabilidade do material após o fim da amassadura, sendo a propriedade que afeta diretamente o seu transporte ao longo de todo o processo de impressão. Esta propriedade varia ao longo do tempo e é afetada por fatores ambientais como temperatura e humidade.                    | “Printability” |
| “Buildability”  | Refere-se ao desenvolvimento da microestrutura do material e ganho de resistência ao longo das primeiras idades, que assegura o empilhamento sucessivo de camadas sem deformação excessiva, quanto melhor “buildability” tiver o material, menor será o risco de construções mais altas colapsarem. |                |
| “Extrudability” | Este requisito relaciona-se com as características que asseguram a deposição em filamentos contínuos e estáveis, através de um bocal. Materiais com má “extrudability” originam bloqueios no sistema ou interrupções no filamento.  |                |

Tabela 1. Requisitos para impressão 3D com materiais cimentícios (adaptado de [3]).

#### 3.2. Estudo da composição da argamassa

Apesar de já existir literatura vasta sobre a impressão 3D com materiais cimentícios, em geral, não são revelados muitos detalhes sobre a composição da argamassa utilizada. Bos, F., Wolfs, R., & Salet, T., [2] sugerem para materiais constituintes os seguintes:

- Cimento Portland (CEM I 52,5 R);
- Agregado Silicioso, com granulometria de 1mm de diâmetro;
- Fíler Calcário e aditivos para facilitar o bombeamento;
- Modificadores reológicos para obtenção de tixotropia na argamassa fresca;
- Pequenas quantidades de fibras de polipropileno para a redução de fissuras, devido a secagens precoces.

Na Tabela 2, apresentam-se características de algumas argamassas utilizadas para impressão, encontradas na literatura. Verifica-se que, em geral, são materiais que atingem resistências relativamente elevadas nas primeiras idades; os materiais finos são constituídos por uma mistura de cimento e outras adições pozolânicas; e para além do uso de superplastificantes é frequente o recurso a adjuvantes retardadores.

| Material  | Criador              | Constituintes  | Características   | Ref. |
|-----------|----------------------|--|---|------|
| Argamassa | CyBe                 | Cimento, areia; (...)  | Resistência à compressão, de 25 MPa (1 dia); disponível em várias cores.  | [4]  |
| Argamassa | Lund University      | Cimento; areia; cinzas volantes; sílica ativa, água; retardadores; superplastificante.           | Resistência á compressão de 105 MPa e à tração de cerca de 13 MPa.  | [5]  |
| Argamassa | Weng, Li, Tan, Qian. | Cimento; sílica ativa, areia de sílica, cinzas volantes, areia de rio, água, superplastificante. | A melhor composição, obtida com estes constituintes, atinge resistências à compressão de 60 MPa, e à flexão de 4,5 MPa (28 dias). | [6]  |
| Argamassa | Hwang e Khoshnevis   | Cimento; areia; água; superplastificante.  | Resistência à compressão de aproximadamente 19 MPa (7 dias)   | [7]  |

Tabela 2. Exemplos de alguns materiais cimentícios, utilizados em impressão.

### 3.3. Composição da argamassa para impressão

Tendo em conta a pesquisa anterior, as argamassas estudadas no presente trabalho são constituídas pelos seguintes materiais indicados na Tabela 3, onde se indicam também as proporções relativas nas quais estes materiais foram utilizados. A inclusão de materiais como o filer calcário e o metacaulino, para além de diminuírem a utilização de cimento cuja produção resulta em emissões de CO<sup>2</sup> para a atmosfera, melhoram o comportamento reológico [2], e contribuem para a diminuição da porosidade no material, afetando positivamente a durabilidade [8].

| Argamassa              | A      |
|------------------------|--------|
| Cimento (CEM I 42.5 R) | 23,6%  |
| Filer Calcário         | 13,5%  |
| Metacaulino            | 7,8%   |
| Areia Fina             | 44%    |
| Água                   | 10,4 % |
| Superplastificante     | 0,7%   |

Tabela 3. Proporções relativas na composição da argamassa.

Neste trabalho foram estudadas 3 argamassas. A argamassa A é a indicada na Tabela 3. As restantes, argamassa B e C, tiveram a mesma composição, no entanto foram incluídas fibras metálicas com 6mm e 13 mm de comprimento, respetivamente. A inclusão destas fibras, nas misturas, ocupará 2% do volume total de cada argamassa. Na Tabela 4, apresentam-se as características das fibras metálicas utilizadas.

|            | Comprimento (mm) | Diâmetro (mm) | Massa específica (kg/m <sup>3</sup> ) | Resistência à tração (MPa) |
|------------|------------------|---------------|---------------------------------------|----------------------------|
| Krampharex | 6                | 0,175         | 7850                                  | 2100                       |
| Dramix     | 13               | 0,2           | 7850                                  | 2750                       |

Tabela 4. Características das fibras metálicas utilizadas nas argamassas B e C.

### 3.3. Fatores que influenciam a impressão

Durante um processo de impressão 3D com material cimentício existem vários parâmetros que influenciam a qualidade de impressão, sendo eles a geometria da peça, as propriedades do material e as configurações da impressão, representados esquematicamente na Figura 2.

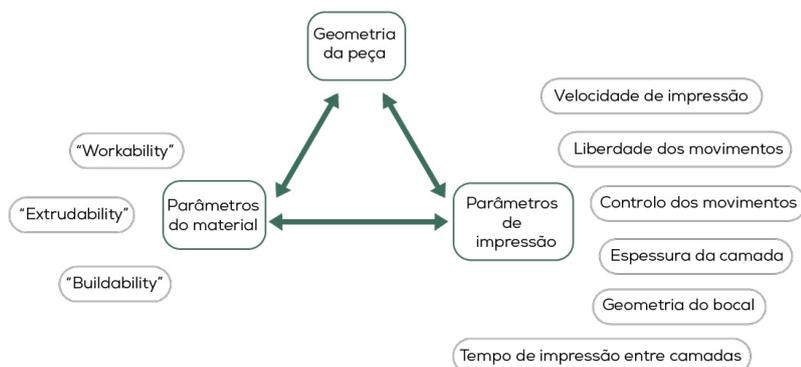


Figura 2. Fatores que influenciam a impressão (adaptado de [3]).

O sistema de impressão utilizado neste trabalho proporciona a extrusão do material e a sua deposição em camadas, no entanto, não permite controlar com rigor vários fatores determinantes para a qualidade da peça (Fig. 2).

## 4. CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS

### 4.1. Evolução das propriedades da argamassa ao longo do tempo

Para determinar o período no qual o material atinge as propriedades ótimas para impressão, "Printability", foram realizados dois tipos de ensaios: ensaios de espalhamento e impressão de filamentos ao longo do tempo, à semelhança do trabalho de Ma, Li, e Wang [3].

#### 4.1.1. Ensaio de espalhamento

O ensaio de espalhamento consiste no enchimento de um molde tronco-cônico, com argamassa, semelhante ao molde da Figura 3. Após o enchimento do molde, este é levantado perpendicularmente à mesa na qual está assente, o material será então libertado, deformando-se na superfície da mesa. Quando o movimento parar são medidos dois diâmetros da área de espalhamento formada. A média destes dois diâmetros resulta no índice de deformabilidade da argamassa.



Figura 3. Molde tronco-cônico utilizado no ensaio de espalhamento.

Os ensaios de espalhamento foram realizados desde o minuto 3 até ao minuto 25 após o final da amassadura. O intervalo de tempo não foi previamente estipulado, ou seja, o tempo entre cada ensaio resulta do tempo de enchimento, limpeza da mesa, enchimento do molde e execução do ensaio.

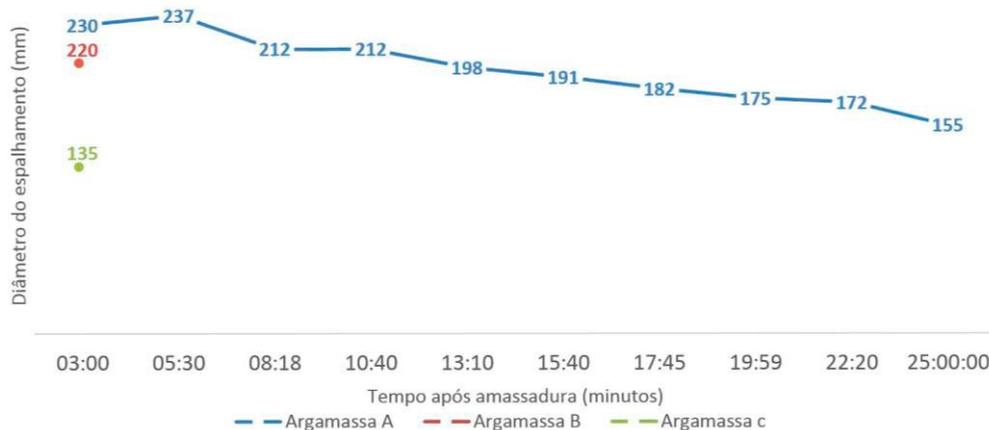


Figura 4. Resultados dos ensaios de espalhamento.

Na curva da Figura 4, estão representados os diâmetros de espalhamento da argamassa A ao longo do tempo. A diminuição do diâmetro está diretamente relacionada com a perda de fluidez do material. Podemos observar que existe um ligeiro aumento do diâmetro do espalhamento do 1º para o 2º ensaio, que pode ser justificado com o facto de o efeito do superplastificante se prolongar ainda ao longo dos primeiros minutos após o fim da amassadura.

Os resultados obtidos levam-nos a concluir que ao longo do tempo existe uma perda de fluidez, sendo que o material deixa de ser capaz de se deformar sem a ajuda de energia externa ao fim de cerca de 25 minutos.

Os valores apresentados com a cor vermelha e verde, correspondem aos resultados dos ensaios de espalhamento realizados, aos 3 minutos, com as argamassas B e C, respetivamente. A perda de fluidez foi de 4% na argamassa B e de 41% na argamassa C, comprovando que a inclusão de fibras e o seu comprimento tem influência na trabalhabilidade da argamassa.

#### 4.1.2. Impressão de filamentos ao longo do tempo

Estes ensaios consistiram na impressão de filamentos ao longo do tempo, extrudidos pelo sistema de impressão apresentado anteriormente. A superfície de impressão utilizada ao longo destes ensaios foi um acetato, com baixo atrito superficial. A altura do bocal face à superfície de impressão foi definida com base na regra de que deve ser igual ou inferior à abertura do bocal (Tab. 5), promovendo a compactação das camadas que melhora a sua ligação [2, 3].

|                                    |                        |
|------------------------------------|------------------------|
| Bocal (diâmetro / altura / forma): | 20mm / 20mm / circular |
| Argamassa:                         | A / B                  |
| Superfície:                        | Acetato                |

Tabela 5. Condições de impressão dos filamentos da Figura 5 e 6.

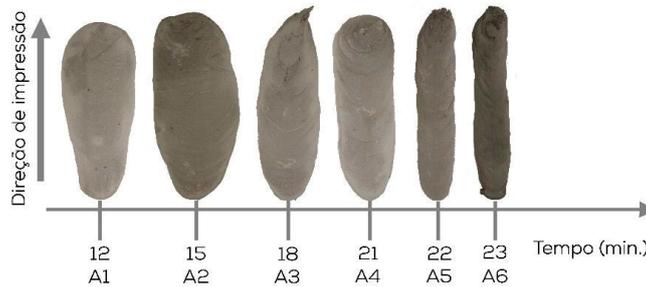


Figura 5. Evolução da largura dos filamentos impressos com argamassa A.

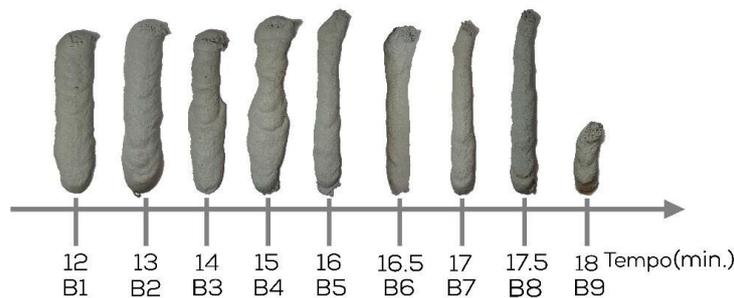


Figura 6. Evolução da largura dos filamentos impressos com argamassa B.

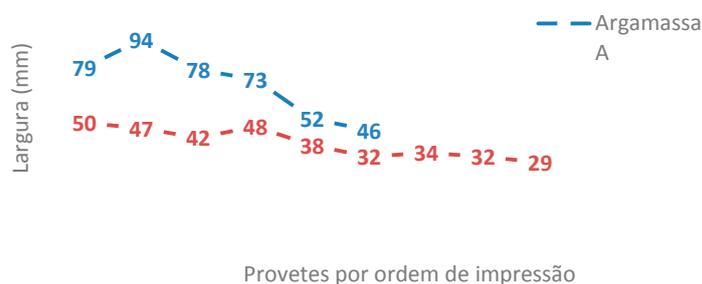


Figura 7. Larguras dos filamentos das Figuras 5 e 6.

Na análise deste ensaio podemos observar que a argamassa B, com 2% de fibras de 6mm, tem menor fluidez que a argamassa A, no mesmo período. Isto é claramente visível no provete A1, que apresenta uma deformação maior que o provete B1. É necessário recorrer aos provetes A5 e A6, impressos aos 22 e 23 minutos, respetivamente, para obter resultados semelhantes aos provetes B1 e B2 (Fig. 5, 6 e 7)

Podemos então concluir que a inclusão de fibras aumenta a “buildability” do material, sendo apenas necessários 12 minutos de espera, após amassadura, para iniciar a impressão com filamentos consistentes e uniformes.

#### 4.2. Caracterização mecânica

A utilização da impressão 3D, resulta, normalmente, na perda da isotropia do material, ou seja, a resistência do material varia com a direção de ensaio, dependendo fortemente das condições da impressão [9]. Para avaliar a potencial perda de resistência na direção mais desfavorável, foram ensaiados provetes de referência moldados com as dimensões 40x40x160 mm, assim como provetes impressos. Esses provetes foram submetidos a ensaios de flexão e compressão segundo a norma NP EN 196-1:2005, tendo sido ensaiados pelo menos 2 provetes para cada condição.

Para impressão dos provetes foi utilizado o bocal com secção transversal retangular com 35x15mm<sup>2</sup>, a uma altura de 15 mm. Praticamente não houve tempo de espera entre a deposição do material das diferentes camadas. Todos os provetes, moldados e impressos, foram colocados em água e submetidos, a um período de cura de 28 dias, em ambiente saturado numa câmara climática, com temperatura e humidade controlada, 20 °C e 95%, respetivamente.

Antes do ensaio, os provetes foram cortados lateralmente para eliminar irregularidades superficiais decorrentes da impressão. Durante o ensaio a aplicação de carga foi efetuada na direção paralela ao plano de interface entre camadas, por se entender ser este o pior cenário em termos de solitação.

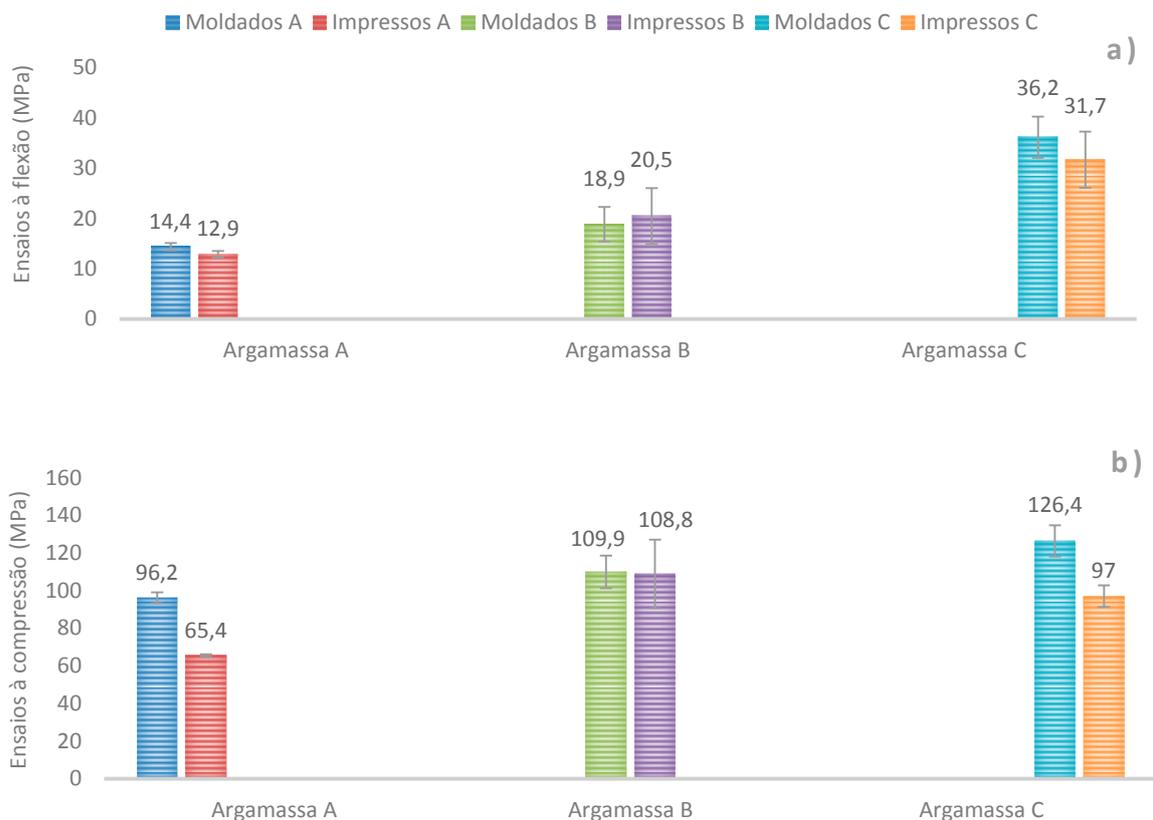


Figura 8. Média de resultados obtidos nos ensaios à: a) flexão e b) compressão.

Comparando os resultados dos provetes moldados, conclui-se que a inclusão de fibras na mistura aumentou consideravelmente as propriedades mecânicas. Na argamassa B, obteve-se um aumento de resistência à tração de 30%, e de 14% à compressão. Na argamassa C, obteve-se um aumento de resistência de 151% e 31%, à flexão e à compressão, respetivamente. Nos provetes impressos existe uma perda de resistência, tal como descrito na literatura [11, 16]. A argamassa A apresenta uma perda de 10% de resistência à flexão e de 32% à compressão. A argamassa B possui resultados com menor discrepância entre impressos e moldados, tendo ganhos de resistência de 8% à flexão e perdas de 1% à compressão. Por último, temos a argamassa C, tem perdas de 12% à flexão e de 23% à compressão. Neste caso, a diferença entre provetes moldados e impressos, pode ser justificada com a perda de trabalhabilidade da mistura, que poderá ter resultado numa pior ligação entre camadas. Pode-se ainda concluir que a inclusão de fibras, junto com uma boa trabalhabilidade da argamassa, pode contribuir para uma melhor ligação entre camadas, contrariando a perda de resistência nos provetes impressos (Fig. 8).

## 5. PEÇAS IMPRESSAS

### 5.1. Vaso

Tendo analisado as 3 composições de argamassas, decidiu-se comprovar a “printability” da argamassa B, com a impressão de uma peça (vaso). A escolha desta argamassa deve-se ao facto de apresentar resistências à compressão e flexão superiores à da argamassa A, e por apresentar melhores resultados de impressão nos filamentos da Figura 6. A argamassa C não foi utilizada devido ao comprimento das fibras ser demasiado elevado para a abertura do bocal de 15 mm, o que poderia resultar em entupimentos.

Para o vaso ser impresso foi adaptado ao sistema uma mesa giratória, sobre a mesa inicial, que possibilitou a impressão da forma cilíndrica do vaso (Fig. 9). Algumas das camadas apresentam deformações devido aos movimentos irregulares proporcionados pela mesa de impressão manual. As características principais do processo de fabrico encontram-se indicadas na Tabela 6.

|  |                       |
|--|-----------------------|
| Bocal (abertura / altura / geometria): | 15mm / 10mm / redondo |
| Superfície:                            | Acetato               |
| Altura da peça                         | 110 mm                |
| Número de camadas:                     | 12                    |
| Diâmetro (inferior / superior)         | 153/157 mm            |

Tabela 5. Detalhes de impressão do vaso da Figura 9.



Figura 9. Processo de impressão do vaso com a argamassa B e contexto funcional, respetivamente.

### 5.2. Considerações finais

As propriedades do material conferem ao produto um tempo de vida útil elevado, tendo resistência suficiente para suportar impactos assim como o desgaste decorrente da função prevista. A incorporação de resíduos industriais em betões tem vindo a ser estudada na FEUP e, numa fase posterior desta investigação, será também considerada a sua inclusão nos materiais cimentícios destinados à impressão 3D. Outro aspeto relevante que interessa investigar em trabalhos futuros é a capacidade de reciclagem destes produtos no respetivo “fim de vida”, indo ao encontro do conceito de Economia Circular que assenta na redução, reutilização, recuperação e reciclagem de materiais e energia.

## 6. CONCLUSÕES

- A impressão 3D é uma tecnologia em forte crescimento e com enormes vantagens do ponto de vista ecológico e económico. No entanto, é necessário o desenvolvimento de argamassas com propriedades específicas de “workability”, “buildability” e “extrudability”, o que propicia o aparecimento de novos materiais para a construção.

- Neste trabalho desenvolveu-se uma formulação de argamassa com propriedades adequadas para a impressão 3D, tendo-se produzido provetes para caracterização de propriedades mecânicas, que permitiram selecionar a melhor formulação para a impressão de uma pequena peça demonstrativa de validação desta tecnologia para o setor da construção civil.
- Uma das maiores vantagens deste processo é a impressão de formas livres e orgânicas sem recurso a cofragem, que reduz drasticamente o preço final da construção assim como o desperdício de materiais.
- Um dos problemas deste processo de fabrico pode ser a perda de isotropia do material, que deverá ser bem caracterizada e contabilizada ao nível do projeto de estruturas com a técnica de impressão 3D.

## 7. AGRADECIMENTOS

Agradecimento ao financiamento do Projeto NORTE-01-0145-FEDER-000022 - SciTech - Science and Technology for Competitive and Sustainable Industries, cofinanciado pelo Programa Operacional Regional do Norte (NORTE2020), através do Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER) e ao Projeto POCI-01-0145-FEDER-007457 - CONSTRUCT - Instituto de I&D em Estruturas e Construções - financiado pelo Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER), através do COMPETE2020 – Programa Operacional Competitividade e Internacionalização (POCI) e por fundos nacionais através da Fundação para a Ciência e a Tecnologia I.P.

## REFERÊNCIAS

- [1] I. Hager, A. Golonka, and R. Putanowicz, "3D Printing of Buildings and Building Components as the Future of Sustainable Construction?," *Procedia Engineering*, vol. 151, no. Supplement C, pp. 292-299, 2016/01/01/ 2016.
- [2] F. Bos, R. Wolfs, Z. Ahmed, and T. Salet, "Additive manufacturing of concrete in construction: Potentials and challenges of 3D concrete printing," *Virtual and Physical Prototyping*, vol. 11, no. 3, pp. 209-25, / 2016.
- [3] G. Ma, Z. Li, and L. Wang, "Printable properties of cementitious material containing copper tailings for extrusion based 3D printing," *Construction and Building Materials*, vol. 162, pp. 613-627, 2018/02/20/ 2018.
- [4] CyBe Construction. (2017, 2 de fevereiro de 2018 ). *CyBe Mortar*. Available: <https://www.cybe.eu/cybemortar/>
- [5] L. H. Anell, "Concrete 3D printer," Master Master Division of Machine Design, Department of Design Science, Faculty of Engineering LTH Lund University 2015.
- [6] Y. Weng, M. Li, M. J. Tan, and S. Qian, "Design 3D printing cementitious materials via Fuller Thompson theory and Marson-Percy model," *Construction and Building Materials*, vol. 163, pp. 600-610, 2/28/ 2018.
- [7] D. Hwang and B. Khoshnevis, "Concrete wall fabrication by contour crafting," in *21st International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC 2004)*, Jeju, South Korea, 2004.
- [8] A. S. Silva, "Adição de metacaulino em betão: efeitos sobre durabilidade " presented at the Metacaulino em Portugal: Produção, Aplicação e Sustentabilidade Aveiro fevereiro de 2013 2013. Available: [https://run.unl.pt/bitstream/10362/11209/1/Vargas\\_2013.pdf](https://run.unl.pt/bitstream/10362/11209/1/Vargas_2013.pdf)
- [9] C. C. M. Doomen, "The Effect of Layered Manufacturing on the Strength Properties of Printable Concrete," Eindhoven University of Technology, 2016.