



# **Aplicação de Impressão 3D na Construção Civil: Caso de Estudo de Mobiliário Urbano**

Mestrado em Engenharia Civil – Construções Civas

Francis Giovani Brun

Leiria, novembro de 2020



# **Aplicação de Impressão 3D na Construção Civil: Caso de Estudo de Mobiliário Urbano**

Mestrado em Engenharia Civil – Construções Cívicas

Francis Giovanni Brun

Dissertação realizada sob a orientação do Professor Doutor Florindo José Mendes Gaspar e do Professor Artur Jorge dos Santos Mateus.

Leiria, novembro de 2020

# **Originalidade e Direitos de Autor**

A presente dissertação é original, elaborada unicamente para este fim, tendo sido devidamente citados todos os autores cujos estudos e publicações contribuíram para a elaborar.

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição de que seja mencionado o Autor e feita referência ao ciclo de estudos no âmbito do qual a mesmo foi realizado, a saber, Curso de Mestrado em Engenharia Civil – Construções Civas, no ano letivo 2019/2020, da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria, Portugal, e, bem assim, à data das provas públicas que visaram a avaliação destes trabalhos.

# Agradecimentos

A minha mãe Beatriz Teresinha Barroso que me ensinou o que era certo, me corrigiu no que era errado e me proporcionou o poder de sonhar o futuro, sendo sempre a pessoa que mais me encorajou e deu suporte na vida, tratando-se sem dúvidas, a personalidade com maior mérito em qualquer realização obtida por mim, em toda minha vida. Ao meu padrasto Neri Baron por me ensinar em cima de um barco que a paciência é uma virtude valiosa para poder conquistar o que se deseja. Ao meu irmão Jeferson Rodrigo Brun, por ser o exemplo da minha vida, mostrando que obstáculos nada mais são do que pedras que se tornam fundações do nosso caráter. Ao meu pai Luiz Vital Brun, por ser a primeira pessoa a me mostrar que se pode continuar gostando de uma pessoa por mais distante que ela esteja. Aos meus sogros Ivone Maria Marx Anschau e Paulo Jandir Rohleder Anschau por todo apoio e preocupação, a minha namorada Andressa Marx Mallmann por estar presente comigo não apenas em minha graduação, mas nessa etapa de mudanças na minha vida em Portugal, sendo por muitas vezes minha sustentação psicológica e emocional.

Ao professor Florindo José Mendes Gaspar, pela oportunidade de estudar este processo construtivo, pela sua disponibilidade, tempo e orientação. Ao meu coorientador Artur Jorge dos Santos Mateus, pelo tempo dedicado ao desenvolvimento da tese.

Ao professor Éder Claro Pedrozzo, que sempre me incentivou e me apresentou o estudo de elementos argamassados. Ao professor Luis Carlos Prola, que me mostrou a possibilidade de sair do meu país para poder me aperfeiçoar, pelo seu apoio e preocupação em todo o tempo que estive aqui. A engenheira Vânia Marques e a toda a equipe do CDRSP pelo apoio nos ensaios, e a todos os demais professores que tive, desde a professora Sandra Dani na primeira série até os professores do mestrado.

A minha cunhada Simone Sáboia por todos os conselhos dados antes da minha vinda a Portugal e aos meus sobrinhos Pablo Sabóia Brun e Maria Beatriz Sabóia Brun pelo abraço que faz o tio sentir a maior saudade.

A toda minha família e amigos que tiraram um tempo para falar comigo e me lembrar que não fui esquecido.

Ao Sr. Simão Jacinto pela oportunidade e pelo tempo cedido para a conclusão desta pesquisa.

A Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul (UNIJUÍ), por ser a base da minha formação acadêmica, e ao Instituto Politécnico de Leiria (IPL), por todo acolhimento e estrutura para esta etapa de minha formação.

E um agradecimento especial a Deus e a mim mesmo, por ter força e ter aprendido a lutar e perseguir meus sonhos, como minha mãe me ensinou, e a ter utilizado cada pedra no meu caminho como fundação para essa conquista, como meu irmão me ensinou.

# Resumo

A construção civil é uma das áreas onde os avanços tecnológicos não têm surgido de forma muito expressiva. Enquanto noutros setores, como os metalúrgicos, têxteis, robóticos e eletrônicos, a inovação tecnológica é muito frequente, a metodologia da construção em betão armado tem permanecido pouco alterada. Neste sentido, o fabrico aditivo é observado como uma das tecnologias aplicáveis na construção civil, sobretudo na construção em elementos 3D em betão. Entre os maiores desafios na impressão 3D está a adaptação entre o projeto, a máquina e o material. O projeto a ser executado deve passar pela programação que conduz o equipamento pelo trajeto pretendido, e assim o betão possa ser depositado com a forma e resistência suficiente para que as sucessivas camadas possam ser depositadas, dando forma à construção pretendida.

Neste trabalho realizou-se o estudo da impressão 3D com argamassa que preenchesse as necessidades de execução, procurando fazer uma avaliação dos diversos aspetos tecnológicos envolvidos. Neste sentido, foram executadas um conjunto de misturas, com diferentes materiais, com o intuito de descobrir a melhor performance de resistência e de extrusão, acompanhadas da realização de ensaios de consistência e ensaios para determinar as propriedades de resistência da argamassa no estado fresco e após endurecimento. O caso de estudo escolhido para este trabalho permitiu avaliar um conjunto de variáveis envolvidas no processo, tendo sido realizada uma modelação estrutural para analisar os resultados da impressão.

**Palavras-chave:** Impressão 3D, argamassa, fabrico aditivo, extrusão de argamassa, indústria 4.0.

# Abstract

Civil construction is one of the areas where technological advances have not been very significant. While in other sectors, such as metallurgy, textiles, robotics and electronics, technological innovation is very common, the methodology of concrete construction has remained little changed. In this sense, additive manufacturing is seen as one of the technologies applicable in civil construction, especially in the construction of 3D concrete elements. Among the biggest challenges in 3D printing is the adaptation between the project, the machine and the material. The project to be carried out must go through the programming that guides the equipment along the intended path, and thus the concrete can be deposited with the form and strength sufficient for the successive layers can be deposited, giving shape to the intended construction.

In this work, the study of 3D printing with mortar that fulfills the needs of execution was carried out, seeking to make an assessment of the various technological aspects involved. In this sense, a set of mixtures were carried out, with different materials, in order to discover the best resistance and extrusion performances, followed by the evaluation of consistency and tests to determine the mortar resistance properties in the fresh state and after hardening. The case study chosen for this work allowed to evaluate a set of variables in the process, and structural modelling was carried out to analyse the printing results.

**Keywords:** 3D printing, mortar, additive manufacturing, mortar extrusion, industry 4.0.

# Índice

<b>Originalidade e Direitos de Autor</b> .....	<b>iii</b>
<b>Agradecimentos</b> .....	<b>iv</b>
<b>Resumo</b> .....	<b>vi</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>vii</b>
<b>Lista de Figuras</b> .....	<b>xi</b>
<b>Lista de Quadros</b> .....	<b>xiii</b>
<b>Lista de Gráficos</b> .....	<b>xiv</b>
<b>Lista de Siglas e Acrónimos</b> .....	<b>xv</b>
<b>1. Introdução</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1. Enquadramento</b> .....	<b>1</b>
<b>1.2. Objetivos</b> .....	<b>2</b>
1.2.1.  Objetivo geral.....	2
1.2.2.  Objetivo específicos .....	2
<b>1.3. Metodologia</b> .....	<b>3</b>
<b>1.4. Estrutura da dissertação</b> .....	<b>4</b>
<b>2. Revisão Bibliográfica</b> .....	<b>5</b>
<b>2.1. Avanços históricos na construção civil</b> .....	<b>5</b>
<b>2.2. Formas de impressão</b> .....	<b>6</b>
2.2.1.  Jato aglutinante ( <i>Binder Jetting</i> – BJ).....	7
2.2.2.  Deposição por energia direcionada ( <i>Direct Energy Deposition</i> – DED).....	7
2.2.3.  Extrusão de material ( <i>Material Extrusion</i> – ME).....	8
2.2.4.  Jato de Material ( <i>Material Jetting</i> – MJ) .....	9
2.2.5.  Fusão de cama de pó ( <i>Powder Bed Fusion</i> – PBF).....	9
2.2.6.  Construção por laminados ( <i>Sheet Lamination</i> – SL) .....	10
2.2.7.  Fotopolimerização de Resina ( <i>Vat Photopolymerization</i> – VP).....	10
<b>2.3. Materiais constituintes na argamassa</b> .....	<b>10</b>
2.3.1.  Aglomerantes .....	12
2.3.2.  Agregados.....	12
2.3.3.  Pozolana .....	13
2.3.4.  Adjuvantes.....	14
<b>2.4. Composição de materiais cimentícios para Impressão 3D</b> .....	<b>15</b>

<b>3.</b>	<b> Materiais, Equipamentos e Métodos.....</b>	<b>20</b>
<b>3.1</b>	<b> . Materiais.....</b>	<b>20</b>
3.1.1.	Ligantes .....	20
3.1.1.1	<i>Cimento Portland</i> .....	20
3.1.1.2	<i>Cinza volante</i> .....	20
3.1.2.	Agregados .....	21
3.1.3.	Adjuvantes .....	22
3.1.3.1	<i>Superplastificante</i> .....	22
3.1.3.2	<i>Acelerador de presa</i> .....	23
3.1.3.3	<i>Fibras</i> .....	23
<b>3.2.</b>	<b> Equipamentos .....</b>	<b>23</b>
3.2.1.	Equipamento para peças de pequena dimensão.....	24
3.2.2.	Sistema de impressão de grande dimensão.....	25
<b>3.3.</b>	<b> Métodos .....</b>	<b>26</b>
3.3.1.	Ensaios de impressão para estudo da composição da argamassa .....	26
3.3.2.	Consistência por espalhamento e vida útil .....	30
3.3.3.	Resistência mecânica .....	31
3.3.4.	Impressão de um banco .....	33
3.3.5.	Extração e ensaios mecânicos de elementos impressos.....	35
3.3.6.	Ensaios de tração entre filamentos .....	36
3.3.7.	Ensaio de compressão da argamassa fresca.....	39
3.3.8.	Ensaio de corte com argamassa na idade inicial.....	40
3.3.9.	Modelação de elementos finitos .....	41
<b>4.</b>	<b> Resultados .....</b>	<b>43</b>
<b>4.1.</b>	<b> Ensaios de impressão para estudo da composição.....</b>	<b>43</b>
<b>4.2.</b>	<b> Consistência por espalhamento e tempo em aberto .....</b>	<b>48</b>
<b>4.3.</b>	<b> Resistência mecânica .....</b>	<b>49</b>
<b>4.4.</b>	<b> Impressão de um banco.....</b>	<b>51</b>
<b>4.5.</b>	<b> Extração e ensaios mecânicos de elementos impressos .....</b>	<b>53</b>
<b>4.6.</b>	<b> Ensaios de tração entre filamentos.....</b>	<b>55</b>
<b>4.7.</b>	<b> Ensaio de compressão da argamassa fresca .....</b>	<b>57</b>
<b>4.8.</b>	<b> Ensaio de corte com argamassa na idade inicial.....</b>	<b>59</b>
<b>4.9.</b>	<b> Modelação dos elementos impressos com os resultados dos ensaios do módulo de elasticidade e corte.....</b>	<b>60</b>

<b>5. Conclusões.....</b>	<b>63</b>
<b>5.1. Processo de impressão e misturas .....</b>	<b>63</b>
<b>5.2. Sugestão para trabalhos futuros .....</b>	<b>64</b>
<b>Referências Bibliográficas .....</b>	<b>65</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>71</b>
<b>Anexo A – Ficha técnica do Cimento Portland tipo CEM II/B-L 42,5R.....</b>	<b>72</b>
<b>Anexo B – Ficha técnica da cinza volante .....</b>	<b>74</b>
<b>Anexo C – Ficha técnica da análise granulométrica do pó de pedra calcária .....</b>	<b>75</b>
<b>Anexo D – Ficha técnica do superplastificante (Sika ViscoCrete – 1143).....</b>	<b>81</b>
<b>Anexo E – Ficha técnica do acelerador de presa (MasterX-Speed 130).....</b>	<b>84</b>
<b>Anexo F – Certificado de qualidade das fibras (Fibtex Repsol Classe II) .....</b>	<b>87</b>
<b>Anexo G – Tabela do ensaio de corte.....</b>	<b>88</b>

# Lista de Figuras

Figura 1.1 – Fluxograma da metodologia.....	3
Figura 2.1 – Classificação das argamassas (adaptado de Petrucci, 1980) .....	11
Figura 3.1 – Resultado da curva granulométrica .....	22
Figura 3.2 – Braço robótico Yaskawa Montoman HP20F.....	23
Figura 3.3 – Sistema de extrusão de impressões de pequena dimensão .....	24
Figura 3.4 – Misturador de argamassa.....	25
Figura 3.5 – Sistema de impressão de grande dimensão .....	25
Figura 3.6 – Estrutura com paredes verticais.....	26
Figura 3.7 – Estrutura com paredes inclinadas .....	28
Figura 3.8 – Misturador de argamassa mecânico .....	30
Figura 3.9 – Balança de precisão e mesa vibratória .....	32
Figura 3.10 – Ensaio de flexão .....	32
Figura 3.11 – Ensaio de compressão .....	33
Figura 3.12 – Impressão do banco.....	34
Figura 3.13 – Processo de impressão.....	34
Figura 3.14 – Aparência final da impressão .....	35
Figura 3.15 – Peça selecionada para ensaio em laboratório .....	35
Figura 3.16 – Análise da resistência mecânica do elemento na idade de 28 dias .....	36
Figura 3.17 – Provetes selecionados para ensaio de tração entre filamentos .....	36
Figura 3.18 – Ruptura no sentido do filamento .....	37
Figura 3.19 – Ruptura a 90° do filamento.....	37
Figura 3.20 – Área de contato .....	38
Figura 3.21 – Módulo de elasticidade do betão na idade de 15 min.....	39
Figura 3.22 – Deslocamentos dos pontos no <i>Software Kinovea</i> .....	40
Figura 3.23 – Ensaio de corte .....	40
Figura 3.24 – Dados do betão.....	41
Figura 3.25 – Modelo 3D de elementos finitos .....	42

Figura 3.26 – Modelação no <i>Software Robot</i> .....	42
Figura 4.1 – Resultados de impressão da estrutura com paredes verticais .....	43
Figura 4.2 – Resultados de impressão da estrutura com paredes inclinadas (1) .....	45
Figura 4.3 – Resultados de impressão da estrutura com paredes inclinadas (2) .....	47
Figura 4.4 – Primeiro processo de impressão.....	51
Figura 4.5 – Colapso da estrutura na 15ª camada.....	52
Figura 4.6 – Pistolas de ar quente para aceleração do tempo de presa.....	52
Figura 4.7 – Resultado da impressão .....	53
Figura 4.8 – Filamentos com vazios.....	54
Figura 4.9 – Ruptura aos 87 segundos .....	58
Figura 4.10 – Tensão de corte e deformação horizontal sem peso .....	59
Figura 4.11 – Tensão de corte e deformação horizontal com peso .....	59
Figura 4.12 – Tensão máxima de compressão do modelo no <i>Software Robot</i> A) Tensões de compressão; B) Tensões de tração C) Tensões de corte em kPa.....	61
Figura 4.13 – Tensões do modelo estrutural no <i>Software Robot</i> : A) Tensões de compressão; B) Tensões de corte em kPa.....	61

# Lista de Quadros

Quadro 2.1 – Síntese de estudos em impressão 3D <sup>(1)</sup> .....	16
Quadro 2.2 – Síntese de estudos em impressão 3D <sup>(2)</sup> .....	18
Quadro 3.1 – Características da cinza volante.....	20
Quadro 3.2 – Análise granulométrica em laboratório.....	21
Quadro 3.3 – Parâmetros da análise granulométrica.....	22
Quadro 3.4 – Misturas da estrutura com paredes verticais.....	27
Quadro 3.5 – Parâmetros do equipamento de impressão da estrutura com paredes verticais.....	27
Quadro 3.6 – Misturas da estrutura com paredes inclinadas <sup>(1)</sup> .....	28
Quadro 3.7 – Misturas da estrutura com paredes inclinadas <sup>(2)</sup> .....	29
Quadro 3.8 – Parâmetros do equipamento de impressão da estrutura com paredes inclinadas <sup>(1)</sup> .....	29
Quadro 3.9 – Parâmetros do equipamento de impressão da estrutura com paredes inclinadas <sup>(2)</sup> .....	29
Quadro 3.10 – Espalhamento da argamassa.....	31
Quadro 3.11 – Tempo em aberto.....	31
Quadro 4.1 – Resultados da resistência mecânica.....	49
Quadro 4.2 – Resultados dos ensaios de flexão e compressão do elemento impresso.....	53
Quadro 4.3 – Dados do ensaio de tração perpendicularmente à junta.....	55
Quadro 4.4 – Dados do ensaio de tração paralelo a junta.....	56
Quadro 4.5 – Resultados do ensaio de corte.....	59

# Lista de Gráficos

Gráfico 4.1 – Compressão com variação de cinzas volantes.....	49
Gráfico 4.2 – Flexão com variação de cinza volantes .....	50
Gráfico 4.3 – Compressão com variação de fibras .....	50
Gráfico 4.4 – Flexão com variação de fibras.....	50
Gráfico 4.5 – Média de perda na flexão e compressão depois da impressão .....	54
Gráfico 4.6 – Dispersão sobre o elemento de tração .....	55
Gráfico 4.7 – Dispersão sobre o elemento de tração a 90° .....	56
Gráfico 4.8 – Média do módulo de elasticidade dos provetes.....	57
Gráfico 4.9 – Média da tensão máxima dos provetes.....	57
Gráfico 4.10 – Módulo de elasticidade .....	58
Gráfico 4.11 – Reta da tensão de corte.....	60

## Lista de Siglas e Acrónimos

ABS	Acrilonitrila/butadieno/estireno
AM	<i>Adjective manufacturing</i>
ASTM	<i>American Society of Testing and Materials</i>
BJ	<i>Blinder jetting</i>
CC	<i>Contour crafting</i>
CDRSP	Centro para o desenvolvimento rápido e sustentado do produto
DED	<i>Direct energy deposition</i>
EUA	Estados Unidos da América
FDM	<i>Fused deposition modeling</i>
LOM	<i>Laminated object manufacturing</i>
ME	<i>Material extrusion</i>
MIT	<i>Massachusetts Institute of Technology</i>
MJ	<i>Material jetting</i>
PBF	<i>Powder bed fusion</i>
PC	Policarbonato
PCL	Policaprolactona biodegradável
PPSU/PPSF	Polifenilsulfona
RP	Prototipagem rápida
SL	<i>Sheep lamination</i>
UAM	<i>Ultrasonic additive manufacturing</i>
VP	<i>Vat photopolymerization</i>
WFIRM	<i>Wake Forest Institute of Regenerative Medicine</i>
3DCP	3D Cimento Portland
3DP	<i>Three-dimensional printing</i>



# 1. Introdução

## 1.1. Enquadramento

A construção civil é conhecida como uma das indústrias mais poluidoras do meio ambiente além de ser uma indústria que consome uma elevada quantidade de recursos naturais. Em média, um edifício construído nos Estados Unidos da América (EUA), consome cerca de 36% de energia total das indústrias, 30% das matérias primas existentes e 12% de água potável (Klotz and Bodenschatz, 2007). Adicionalmente à taxa de poluição, outro ponto que é prejudicial à construção civil, é seu baixo desempenho em relação a produtividade no processo de construção, tanto em países desenvolvidos, quando nos demais (Nasir *et al.*, 2014).

Para fugir deste paradigma vários estudos com foco na inovação da construção civil têm sido realizados, grande parte com foco na sustentabilidade e inovação. Uma saída para a inovação na construção civil é procurar uma tecnologia de outros setores industriais e adaptá-la ao sistema existente para melhorar o processo, que é algo importante e necessário sendo uma resposta às necessidades, nomeadamente a qualidade (Harty, 2008); (Donaldson and Donaldson, 2016).

Um fator que tende a melhoria da ótica externa à construção civil é a indústria 4.0. Geissbauer *et al.* (2014) refere que a indústria 4.0 é a conversão da informática e automação em sistemas ciber-físicos, uma mistura entre mundo real e virtual em operações com base na tecnologia de informação e comunicação. As principais características da indústria 4.0 estão na integração de sistemas, internet industrial, segurança cibernética, computação em nuvem, grande análise, inteligência artificial, realidade aumentada, simulação, fabrico aditivo, robótica avançada e materiais avançados (Geissbauer *et al.*, 2014); (Vaidya, Ambad and Bhosle, 2018).

Dentre as características da Indústria 4.0 está o fabrico aditivo, definido pela *American Society of Testing and Materials* (ASTM) como sendo "um processo de unir materiais para fazer objetos a partir dos dados do modelo 3D, geralmente camada após camada, em oposição às metodologias de fabrico subtrativas". Sendo assim, o fabrico aditivo procura a redução na exigência de trabalho, diminuindo o custo, alcançando um nível de segurança

maior, reduzindo o estaleiro de obra e tempo da construção, pelo fato de se trabalhar num ritmo constante, assim diminuindo a possibilidade de erros na obra e diminuindo o desperdício de materiais e possibilitando uma maior liberdade arquitetônica (Gao *et al.*, 2015).

Uma técnica de fabrico aditivo é a impressão 3D, onde os produtos são construídos sobre uma base de camada por camada (Berman, 2012). A impressão 3D criada em 1984, tem-se desenvolvido com aplicações em vários tipos de indústrias, tais como a aeroespacial, automotiva e médica (Hager, Golonka and Putanowicz, 2016). Inspirado em impressões com materiais poliméricos, a construção civil abriu um novo horizonte com a impressão 3D usando materiais cimentícios. As cofragens representam um custo elevado de uma estrutura (cerca de 35% a 60%), pelo que têm um impacto direto sobre o custo final de uma edificação que na impressão 3D se pretende eliminar (Rubio, Sonebi and Amziane, 2017).

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. Objetivo geral**

O principal objetivo deste trabalho é aprofundar o conhecimento de outras possibilidades existentes para construção na indústria do fabrico aditivo com foco na impressão 3D de elementos cimentícios e aprofundar o conhecimento sobre o processo de extrusão de argamassas, formas e resistência dos elementos para a construção. Portanto, a pesquisa visa realizar uma mistura de argamassa com boas características para a extrusão, analisando os processos interativos entre a máquina e a pasta no estado fresco e a capacidade de suporte da mistura no processo de extrusão.

### **1.2.2. Objetivo específicos**

- Realizar uma revisão referente à impressão 3D, formas de extrusão, equipamentos e obras construídas através deste processo;
- Realizar uma revisão referente aos materiais constituintes das argamassas e de misturas que obtiveram êxito no processo de impressão;
- Realizar ensaios de extrusão camada sobre camada em robô localizado no Centro para o Desenvolvimento Rápido e Sustentado do Produto (CDRSP), na Marinha Grande, Portugal, com misturas de argamassa preparadas no local;

- Realizar ensaios de caracterização dos elementos cimentícios que obtiveram melhores êxitos no processo de extrusão;
- Realizar ensaios de sobreposição de camadas com desfasamento entre a primeira e as demais camadas constituintes do elemento a ser extrudido, procurando o melhoramento da mistura e observar até que ponto o desfasamento pode ser executado;
- Analisar as propriedades da argamassa fresca com melhores resultados, a fim de buscar elementos necessários para uma modelação matemática em *Software*;
- Modelação em *Software* estrutural para a análise comportamental do material a ser extrudido.

### 1.3. Metodologia

O objetivo deste trabalho é obter conhecimentos para uma aplicação prática, orientada para a solução de problemas específicos. Como primeira etapa, foi realizada uma revisão da literatura sobre o fabrico aditivo e os materiais constituintes.

Posteriormente, a dissertação elaborada teve uma forte componente laboratorial, com a realização dos ensaios necessários à obtenção e caracterização de uma composição de argamassa com bons resultados, incluindo a demonstração através de um caso de estudo.

O fluxograma apresentado na Figura 1.1, mostra as etapas seguidas no desenvolvimento da dissertação.

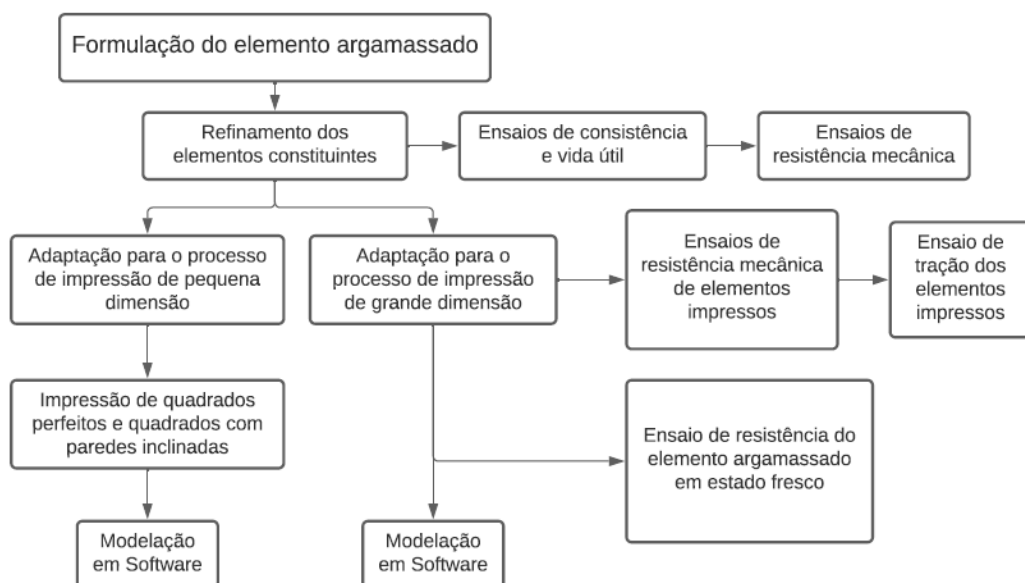


Figura 1.1 – Fluxograma da metodologia

## **1.4. Estrutura da dissertação**

Para o desenvolvimento desta pesquisa foi elaborado um plano de trabalho dividido em capítulos, conforme a descrição a seguir:

Capítulo 1 – Introdução e contextualização que aborda os objetivos deste trabalho bem como a metodologia adotada.

Capítulo 2 – Revisão bibliográfica que aborda os avanços históricos na construção civil, nomeadamente as formas de impressão, materiais constituintes da argamassa e a composição de materiais cimentícios para a impressão 3D.

Capítulo 3 – Exposição da metodologia, materiais e equipamentos utilizados para o desenvolvimento da pesquisa, nomeadamente o programa de ensaios realizado, os equipamentos para impressão de pequena e grande dimensão, os ligantes, agregados e adjuvantes utilizados na pesquisa, bem como a metodologia de modelação do banco.

Capítulo 4 – Descrição e análises dos resultados obtidos no programa de ensaios desenvolvido, e a modelação do banco com os resultados dos ensaios do módulo de elasticidade e corte.

Capítulo 5 – Conclusões e sugestões para estudos futuros.

São incorporados também os Anexos com as fichas técnicas dos ensaios realizados e memoriais de cálculo do dimensionamento.

## 2. Revisão Bibliográfica

### 2.1. Avanços históricos na construção civil

Em 1943 Esnest Neufert idealizava uma máquina de construção de casas, uma fábrica de construção. Sua “*Hausbaumaschine*”, que traduzindo seria máquina de construção, funcionaria através de uma enorme fábrica de construção de casas sobre carris de comboio que ao ser deslocada deixaria para trás uma construção de 5 pisos. Embora muito se tenha tentado, contendo alguns relatos de insucesso na Alemanha oriental, este dispositivo nunca foi construído com sucesso (Weinwsmith and Weinwsmith, 2018).

Em 1983 Charles Hull teve a simples ideia de endurecer os revestimentos de mesa com luz ultra violeta, e essa simples ideia levou a invenção da estereolitografia, a primeira tecnologia de impressão 3D registrada (Hager, Golonka and Putanowicz, 2016). Nesta fase inicial as expectativas não foram atingidas, sobretudo devido ao facto de que os objetos a serem desenvolvidos na impressora, eram desenhados com recurso de ferramentas básicas no CAD, dividindo em formas de 2 dimensões e posteriormente impressos sucessivamente até chegar a forma desejada (Hull, 2015).

Nos anos 90, a *Wake Forest Institute of Regenerative Medicine* (WFIRM) começou a introduzir a tecnologia de impressão tridimensional para obtenção de *scaffolds* (estruturas de suporte) aplicados em processos de regeneração de tecidos em órgãos (Prince, 2014).

Em 2001, o investigador Behrokh Koshnevis da Universidade do Sul da Califórnia e a sua equipa, criaram a primeira tecnologia de Impressão 3D Cimento Portland (3DCP) que recebeu o nome de *Contour Crafting* (CC). A tecnologia consiste na extrusão de betão em estado pastoso com deposição controlada por computador. Na procura das características fundamentais ao betão para uso em impressão 3D, é importante observar que a maior parte dos métodos conhecidos de 3DCP se apoia nos princípios presentes no projeto CC, para formação de uma estrutura através do depósito de camadas de filamento cimentício (Bos *et al.*, 2016). Diversas universidades e empresas de arquitetura e engenharia, demonstraram algumas possibilidades desta técnica. Alguns desses projetos são *D-Shape* em Itália, *Concrete Printing* no Reino Unido, e o *WinSun* na China, projetos tecnicamente distintos, que utilizam a fabricação digital de peças grandes por sobreposição de camadas de betão (Lim *et al.*, 2012)

Entre os pioneiros está a empresa *WinSun*, a qual contém uma impressora gigante com 6 metros de altura, 10 de largura e 40 metros de comprimento, que imprime elementos pré-fabricados. A empresa conseguiu construir 10 casas em menos de 24 horas com impressão em betão, com o custo médio 5000\$ por casa. A mesma tecnologia utilizada na casa foi utilizada também em edifícios de até 5 pisos. A técnica usada é a impressão por camadas, a qual deixa um filamento oco para os processos de isolamento da estrutura. Já na Europa, em 2014 se deu início o projeto Canal House em Amsterdão pela empresa *DUS Architects*. Esse é designado o primeiro projeto inteiramente em 3D de toda a Europa, e segue a linha de impressão pré moldada. Tem até 2,2x2,2x2,5 metros e tem sua montagem posterior. Já são encontradas diversas casas com essa tecnologia na cidade (Malaeb *et al.*, 2015); (Wu, Wang and Wang, 2016).

Outras empresas procuraram aplicar o processo de impressão direto, ou seja, sem a pré modulação. Um exemplo disso ocorreu nas Filipinas, pela empresa *TotalKuston* onde foi construído uma casa de festas de 130m<sup>2</sup> num período de 100 horas. Voltando a um exemplo chinês a empresa *HuaShang Tengda* que construiu, *in loco* um edifício de 2 pisos, com um total de 400 m<sup>2</sup> em 45 dias. Isso mostra que a impressão 3D tem um grande atrativo econômico, além do ambiental (Burem, 2016); (Burem, 2015).

Mais recentemente, em 2020, devido a pandemia mundial pelo Coronavírus, vários artefactos em tecnologia 3D estão sendo utilizados, entre eles protetores de maçanetas, máscaras, viseiras, ventiladores pulmonares, válvulas para bomba de oxigênio (Wishbox, 2020). No âmbito da construção civil, a empresa *WinSun* produziu cápsulas para isolamento social, cada uma com 10m<sup>2</sup> com um tempo aproximado de 2 horas para a construção, chegando ao máximo de 15 cápsulas por dia. O custo de cada cápsula é por volta de US \$ 4000. Ma Yihe, presidente da empresa, afirma que as construções que utilizam materiais recicláveis chegam a ser duas vezes mais resistentes que o betão convencional contendo em cada cápsula camas e um "banheiro ecológico" que lava sem água e usa bactérias para decompor o lixo (GCR, 2020).

## **2.2. Formas de impressão**

Do momento da sua criação até os dias atuais, as máquinas de impressão 3D sofreram várias transformações. Uma variada gama de materiais, podem ser processados, e de forma distinta, trabalhados para a obtenção de um objeto final distinto. A impressão 3D é um tipo de

Prototipagem Rápida (RP), e utiliza uma diversidade de materiais e formas distintas de trabalho. De acordo com a ISO/ASTM 52900:2015 as impressoras 3D podem ter sete classificações diferentes: *Binder Jetting*, *Direct Energy Deposition*, *Material Extrusion*, *Material Jetting*, *Powder Bed Fusion*, *Sheet Lamination* e *Vat Photopolymerization* (ASTM, 2015).

### **2.2.1. Jato aglutinante (*Binder Jetting* – BJ)**

O jato aglutinante é definido pela ASTM International (2013) como um processo de fabrico aditivo em que um agente de ligação líquida é depositado seletivamente para unir os materiais em pó. Inicialmente denominado de *Three-Dimensional Printing* (3DP) ou impressão tridimensional, foi desenvolvida no *Massachusetts Institute of Technology* (MIT) e licenciada para mais de cinco empresas. O processo de impressão consiste na impressão de um ligante em um leito de pó para fabricar a peça. Após o ligante ser depositado no leito do pó, este desce um nível e uma nova camada de pó é depositada para que uma nova camada de ligante possa ser impressa, esse processo é repetido até que a peça seja concluída. A cabeça de impressão contém vários bicos de injeção e diversos caminhos unidimensionais para se padronizar, assim aumentando a produtividade. O processo BJ pode ser dividido em 7 etapas: impressão, cura, despoluição, sinterização, infiltração, recozimento e acabamento e os materiais mais utilizados são cerâmicos, metais, vidros, areias e polímeros (Meteyer *et al.*, 2014); (Gibson, Rosen and Stucker, 2015); (Lee, An and Chua, 2017).

### **2.2.2. Deposição por energia direcionada (*Direct Energy Deposition* – DED)**

A deposição por energia direcionada é definida pela ASTM International (2013) como um processo no qual a energia térmica focada é usada para fundir materiais, derretendo a medida que são depositados. Um exemplo de energia focada pode ser: laser, feixes de elétron ou arco de plasma. A cabeça de impressão do DED consiste em um bico que alimenta as partículas (pó ou fio) até o ponto focal de um feixe de laser. As partículas derretem e solidificam em um substrato antes da deposição que ocorre camada por camada. O método tem complicações para peças complexas pois tem baixa precisão e qualidade superficial. O DED busca reduzir o tempo e o custo de fabricação fornecendo propriedades mecânicas, microestrutura controlada e controle preciso da composição. Sua aplicação está sobretudo no setor automotivo e espacial. Os materiais típicos são pós metálicos industriais usuais que

são económicos, como aços inoxidáveis, cobre, alumínio, titânio, níquel, cobalto e estanho (Ngo *et al.*, 2018); (Lee, An and Chua, 2017); (Thompson *et al.*, 2015).

### **2.2.3. Extrusão de material (*Material Extrusion – ME*)**

A extrusão de material é definida pela ASTM International (2013) como o processo de fabrico aditivo em que o material é dispensado seletivamente através de um bico ou um orifício. Essa deposição de material pelo bico se dá pela aplicação de uma pressão constante e é extrudido com uma velocidade também constante onde se solidifica sobre o substrato logo após sair do bocal. Um fator importante é a ligação de cada fileira impressa para se tornar uma estrutura sólida, ou seja, a primeira camada depositada, que irá receber a camada seguinte, deve estar rígida o suficiente para que a camada subsequente se deposite sobre ela, assim como a primeira se depositou na cama de impressão (Lee, An and Chua, 2017).

A extrusão de material é atualmente a mais comumente encontrada no mercado e é relativamente simples em comparação com outras plataformas AM (*Adjective Manufacturer*). Portanto, se escolhe essa tecnologia como uma área para desenvolver sistemas de materiais e avaliar o desempenho desses materiais em termos de diferentes de propriedades mecânicas baseadas na orientação da construção (Torrado *et al.*, 2015).

Entre os métodos de extrusão de material está a *Fused Deposition Modeling* (FDM) ou modelagem por deposição fundida. Esta tecnologia leva destaque principalmente pelo fato de que os materiais processados são amplamente utilizados em várias indústrias, tais como: acrilonitrila/butadieno/estireno (ABS), reciclável produção de grau termoplástico; policarbonato (PC), que possui melhores propriedades mecânicas que o ABS; polifenilsulfona (PPSU/PPSF), que apresenta boa resistência, resistência química e ao calor e, portanto, é adequada para aplicações aeroespaciais, automotivas e médicas; policaprolactona biodegradável (PCL), usado para aplicações de engenharia de tecidos; cera, necessária para aplicações precisas e específicas, etc. (Galantucci, Lavecchia and Percoco, 2010).

A impressão 3D de betão por extrusão foi baseada no processo FDM. Originalmente a ideia foi concebida no final dos anos 90 (Pegna, 1997). O processo de impressão de elementos de betão vai ser debatido em sua evolução no item 2.4.

Outra tecnologia de impressão por extrusão é a CC que surge como melhor alternativa tecnológica de fabricação de camadas que é aplicável à construção de grandes estruturas, como casas. Entre as vantagens da CC, em comparação com outros processos de fabricação em camadas, é a melhor qualidade superficial, maior velocidade de fabricação e uma maior variedade de materiais (Pegna, 1997)

A aplicação de CC na construção civil é possível através de um sistema de pórtico que transporta o bico se move em duas faixas paralelas instaladas no local da construção. Uma única casa ou um grupo de casas, cada uma com uma planta diferente, pode ser construída automaticamente em uma única execução. Estruturas convencionais podem ser construídas através da integração da máquina CC com um braço de posicionamento e posicionamento de elementos de suporte (Khoshnevis, 2004). Este modelo é parecido com o já citado *Hausbaumaschine*.

#### **2.2.4. Jato de Material (*Material Jetting – MJ*)**

O jato de material tem sua definição concebida pela ASTM International (2013) como um processo de fabrico aditivo em que gotas de material (fotopolímeros e cera) são depositadas seletivamente. As gotículas de líquido são depositadas sobre a plataforma de trabalho para mitigar parcialmente a camada de material anterior e solidificar formando uma peça durante o processo de jato de material. Quando todas as camadas são depositadas, o objeto é removido. As áreas não preenchidas podem ser preenchidas com uma cera derretida solúvel com a mesma espessura da camada de suporte material. (Lee, An and Chua, 2017); (Chua, Chou and Wong, 1998).

#### **2.2.5. Fusão de cama de pó (*Powder Bed Fusion – PBF*)**

A fusão de cama de pó é definida pela ASTM International (2013) como um processo de fabrico aditivo no qual a energia térmica funde seletivamente regiões de um leito de pó. A fusão do PBF pode ser parcial ou completa entre as partículas em pó, seguido por um rolo ou lâmina recobridora para adicionar e alisar uma outra camada de pó. Sendo os principais mecanismos de ligação do processo o de sinterização e de fusão. A principal diferença é que a sinterização é considerada como um processo de fusão parcial, enquanto fusão é considerada como um processo de fusão completo. Em princípio, todos os materiais que podem ser fundidos e solidificados, podem ser utilizados nos processos de PBF, como, por

exemplo, polímeros, metais, cerâmica e materiais compósitos (Gibson, Rosen and Stucker, 2015b); (Kruth *et al.*, 2005).

#### **2.2.6. Construção por laminados (*Sheet Lamination – SL*)**

A construção por laminados tem sua definição concebida pela ASTM International (2013) como um processo de fabrico aditivo em que folhas de material são coladas para formar um objeto. Sendo assim, essa técnica consiste em sobrepor várias camadas de material composto de folhas e cortá-las com laser, ou laminas a fim de ajustar a secção transversal do objeto. Por causa do princípio de construção, apenas os contornos externos das peças são cortados e as folhas podem ser cortadas e depois empilhadas ou empilhadas e, em seguida, cortadas. *Laminated Object Manufacturing* (LOM) e *Ultrasonic Additive Manufacturing* (UAM) são as duas principais categorias, onde as folhas são cortadas através de laser ou combinadas usando ultrassom (Lee, An and Chua, 2017); (Gibson, Rosen and Stucker, 2010).

#### **2.2.7. Fotopolemerização de Resina (*Vat Photopolymerization – VP*)**

A fotopolemerização em resina é definida pela ASTM International (2013) como um processo de fabrico aditivo em que um fotopolímero líquido em um tanque é curado seletivamente por polimerização ativada por luz. Os processos de fotopolimerização utilizam resinas líquidas, curáveis por radiação ou fotopolímeros, como materiais primários. A maioria dos fotopolímeros reage à radiação na faixa de comprimento de onda dos raios ultravioleta (UV), mas alguns sistemas de luz visível também são usados. Após a irradiação, esses materiais passam por uma reação química para se tornarem sólidos. Essa reação é chamada fotopolimerização e é tipicamente complexa, envolvendo muitos participantes químicos tais como foto-iniciadores, aditivos e monómeros reativos/oligómeros (Gibson, Rosen and Stucker, 2010); (Lee, An and Chua, 2017).

### **2.3. Materiais constituintes na argamassa**

A argamassa é um produto obtido pela mistura de ligante com agregado e água, podendo ser definida como todo e qualquer material com propriedades aglutinantes. Junto a esses materiais pode-se adicionar certos elementos que irão melhorar certos aspetos e fornecer determinadas características, neste seguimento são inseridos os adjuvantes ou as pozolanas (Margalha, 2007).

As argamassas são constituídas por material ativo, sendo eles: a pasta (aglomerante e água), e por material inerte (o agregado miúdo) (Petrucci, 1980).

A Figura 2.1 mostra a classificação da argamassa. O primeiro ponto refere-se ao emprego, sendo designadas de comuns ou refratária. As argamassas comuns são as de uso corrente na construção civil, já as refratárias são as que devem resistir a grandes temperaturas, para isso requerendo agregados especiais, como argila refratária e vermiculita.

O segundo ponto se refere aos aglomerantes, que será exposto no item 2.3.1, assim como os elementos ativos do terceiro ponto.

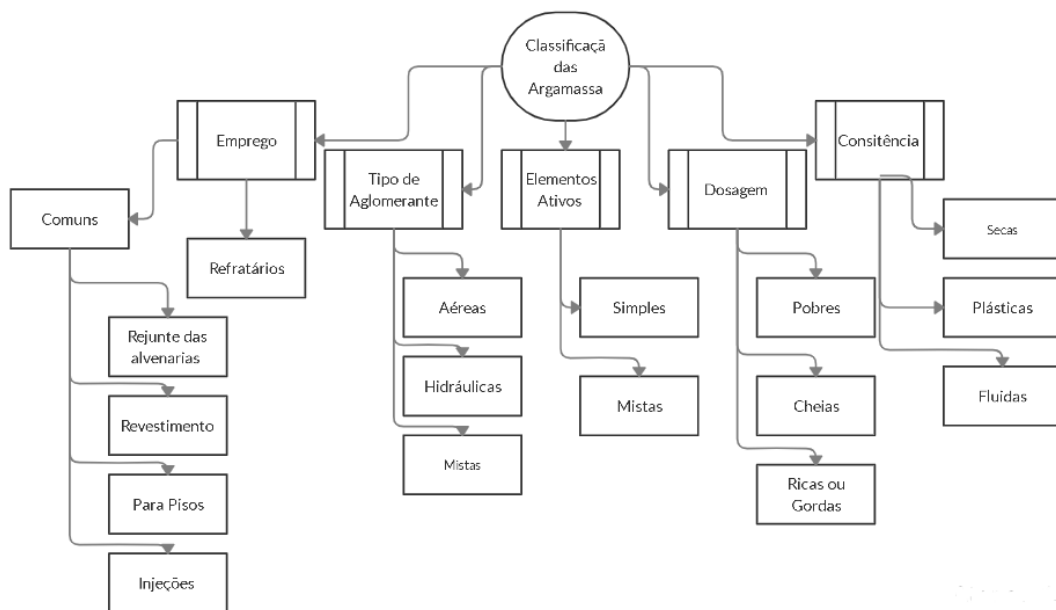


Figura 2.1 – Classificação das argamassas (adaptado de Petrucci, 1980)

Na classificação da dosagem da argamassa podemos observar uma relação da pasta com o agregado (Petrucci, 1980):

- Pobres: onde o volume de aglomerantes é insuficiente para preencher o número de vazios,  $V_{PASTA} < V_{VAZIOS}$ ;
- Cheias: quando o volume de vazios está preenchido exatamente pela pasta existente,  $V_{PASTA} = V_{VAZIOS}$ ;
- Ricas ou gordas: quando há um excesso de pasta,  $V_{PASTA} > V_{VAZIOS}$ .

No que se refere a consistência, como visualizado no diagrama da Figura 2.1, a argamassa pode ser dividida em 3 pontos, todos tendo como maior balizador a quantidade de água (Carasek, 2007):

- Secas: A pasta do aglomerante somente preenche os vazios entre os agregados, assim os deixando ainda em contato, existindo o atrito entre as partículas, resultando em uma massa áspera;
- Plásticas: a pasta aglomerante “molha” em uma fina camada a superfície dos agregados, assim dando boa adesão entre eles com uma estrutura pseudo-sólida;
- Fluidas: As partículas de agregado estão imersas no interior da pasta aglomerante, sem coesão interna e com tendência de depositar-se por gravidade (segregação). Os grãos de areia não oferecem nenhuma resistência ao deslizamento, mas a argamassa é tão líquida que se espalha sobre a base, sem permitir a execução adequada do trabalho.

A consistência da argamassa pode ser avaliada através da norma EN 1015-3 (1999).

### **2.3.1. Aglomerantes**

Os aglomerantes, também conhecidos como ligantes, são produtos utilizados para ligar ou aglomerar outros como areias e gravilhas. Estes materiais, com o tempo, modificam a estrutura química e contribuem para o endurecimento da pasta (Margalha, 2007).

As argamassas podem ser classificadas conforme o tipo de aglomerante, como já visto na Figura 2.1. Existem as argamassas aéreas, constituídas de cal aérea ou gesso; as argamassas hidráulicas, que contém cal hidráulica ou cimento e as argamassas mistas, que contém dois aglomerantes (cimento e cal aérea) (Fiorito, 2009); (Dubaj, 2000).

Esta classificação é muito parecida com a classificação dos elementos ativos. Podemos definir o elemento ativo simples as argamassas aéreas e hidráulicas, por possuir apenas um elemento ativo, e de elemento ativo composto as argamassas mistas, por possuir dois elementos ativos em sua mistura. Assim uma argamassa hidráulica ou aérea é um elemento ativo simples e uma argamassa composta é um elemento ativo misto (Petrucci, 1980).

### **2.3.2. Agregados**

Segundo Petrucci (1980), agregado miúdo é o material granular sem forma e volume definidos, praticamente inertes, e com propriedades adequadas e específicas para o uso em engenharia.

A forte influência dos agregados no comportamento da argamassa pode ser descrita pela dureza, a forma dos grãos, a granulometria e a porosidade que afetam o comportamento da argamassa, além do facto da sua origem e seu estado de pureza. Em si o agregado é o esqueleto da argamassa que ganha coesão pela ligação dos grãos com o ligante, sendo assim a qualidade do agregado é essencial para o comportamento da pasta (Margalha, 2007).

A classificação dos agregados pode ser dada da seguinte maneira (Bauer, 2011):

- Origem: – Naturais: os que se encontram já particulados na natureza, como areia e cascalho; – Industrializados: os que são obtidos através de processos industriais, podendo ser rocha, escória de alto forno e argila;
- Dimensões das partículas: – Miúdo: as areias; – Graúdo: os cascalhos e as britas;
- Peso específico aparente: – Leve com densidade aparente média até 1; – Médio com densidade aparente média até 2; – Pesado com densidade aparente média maior que 2.

### **2.3.3. Pozolana**

As cinzas volantes são materiais pozolânicos (materiais siliciosos ou sílico-aluminosos) que por si só possuem pouca ou nenhuma propriedade cimentícia, mas que, quando finamente dividido e na presença de humidade, reage com o hidróxido de cálcio para formar compostos com propriedades cimentícias a temperatura ambiente (Dal Molin, 2011). A cinza volante é um resíduo industrial, obtida através da combustão do carvão mineral em caldeiras de leitos fluidizados. Esses resíduos podem resultar em uma matéria-prima para a produção de argamassas destinadas para: assentamentos de pisos, reboco e nivelamento de paredes, formação de contra pisos, dentre outras aplicações (Ferreira *et al.*, 2014). O uso de cinzas volantes de biomassa como substituto parcial do cimento em materiais de construção, permite a minimização da utilização de recursos materiais necessários para a produção de cimento (Tarelho *et al.*, 2012). A substituição parcial do cimento Portland por cinzas volantes, traz benefícios para uma economia circular, sendo as cinzas mais empregadas as de escórias de fornos de carvão mineral. Alguns benefícios da cinza volante se dá na melhoria do estado fresco da mistura, aumentando a coesão, viscosidade, plasticidade e reduzindo a exsudação e segregação (Dal Molin, 2011). As pozolanas são materiais que não têm características de ligantes por si só mas combinados com a cal à temperatura normal e

na presença da água, formam compostos insolúveis estáveis que possuem as propriedades dos ligantes (Margalha, 2007).

Em função do maior módulo de finura e maior resiliência, os cimentos fabricados com teores de materiais pozolânicos mais elevados, produzem argamassas com propriedades otimizadas (Sabbatini, 1998).

#### **2.3.4. Adjuvantes**

Os adjuvantes são produtos que adicionados aos materiais lhes conferem determinadas propriedades e anulam efeitos negativos no seu comportamento, melhorando suas propriedades quer no seu estado fresco, quer no seu estado endurecido como também pode ser na alternância de fase. Muitos destes adjuvantes têm origem sintética e ainda não é possível conhecer o seu efeito a longo prazo, pelo que, a sua utilização deve ser moderada em argamassas (Margalha, 2007); (Aroso, 1991).

Os adjuvantes se distinguem dos aditivos no valor de adição ao betão. Os adjuvantes são incorporados ao betão numa proporção inferior a 5% do peso em cimento, e o aditivo em valor superior a 5% ao peso do aglomerante (Aroso, 1991).

Os principais produtos utilizados atualmente são:

- **Plastificantes:** adjuvantes utilizados para aumentar a trabalhabilidade, reduzindo o teor de água necessário para misturar o material, gera um endurecimento menos poroso, e por consequência dá maior resistência (Vieira, 2012); (Gonçalves, 2011); (Mikanovic and Jolicoeur, 2008); (Le *et al.*, 2012);
- **Aceleradores e retardadores de presa:** agem no tempo de reação da pasta, e fazem a pasta endurecer mais rápido, aumentando resistência mecânica em períodos iniciais, tendo como consequência diminuição da trabalhabilidade e tempo em aberto, sendo usados principalmente em climas frios e húmidos. Já o retardadores, diminuem a velocidade de reação da pasta, prolongando o processo de hidratação, assim aumentando a trabalhabilidade e a viscosidade da pasta, são utilizados em climas quentes diminuindo assim a retração (Vieira, 2012); (Gonçalves, 2011); (Kosmatka and Wilson, 2011); (Fernandes and Silva, 2017);
- **Introdutores de ar:** usados para provocar bolhas de ar de diâmetros entre 0,02 e 0,1 mm que serve como barreiras a rede de poros capilares impedindo o transporte de

fluídos, assim melhorando a impermeabilização e as oscilações do material no ciclo de gelo-degelo. Aumentam a trabalhabilidade e homogeneidade da pasta diminuindo a quantidade de água na amassadura, e diminuem a fissuração (Vieira, 2012); (Gonçalves, 2011);

- Hidrófugos: impedem ou diminuem a penetração ou circulação de água diminuindo a tensão capilar dos poros. Gera aumento de impermeabilização, da resistência gelo-degelo e minimiza ou diminui o aparecimento de fungos (Vieira, 2012); (Gonçalves, 2011);
- Promotores de aderência: usados para aumentar a aderência da argamassa em qualquer substrato, como consequência, se tem o aumento da resistência mecânica e durabilidade do material, além de redução da permeabilidade (Vieira, 2012); (Gonçalves, 2011);
- Fungicidas: impedem a fixação e proliferação de micro-organismo (fungos e bolores) (Vieira, 2012); (Gonçalves, 2011);
- Pigmentos: busca conferir coloração a argamassa (Vieira, 2012); (Gonçalves, 2011);
- Fibras: busca melhorar a resistência à tração e compressão, a ductilidade e resistência a fissuração. As fibras influenciam a hidratação e carbonização do material melhorando a coesão e a resistência à penetração da água (Vieira, 2012); (Gonçalves, 2011); (Bolander, Choi and Duddukuri, 2008); (Liu *et al.*, 2012); (Noushini, Samali and Vessalas, 2013); (Pereira 2015);
- Cargas Leves: buscam diminuir a massa volumétrica da argamassa. A introdução da carga leve pode reduzir as propriedades mecânicas da argamassa, se aumentar a quantidade de água da amassadura, aumenta a retração durante a presa e diminuem a resistência de gelo-degelo (Vieira, 2012); (Gonçalves, 2011);
- Agentes expansivos: buscam diminuir a retração durante a presa e endurecimento da argamassa melhorando a homogeneidade dimensional do material (Vieira, 2012); (Gonçalves, 2011).

## **2.4. Composição de materiais cimentícios para Impressão 3D**

Os estudos sobre impressão 3D para anais de conferências e artigos de periódicos relacionados a indústria da construção civil publicados de 1997 a 2016 vem aumentando exponencialmente. No período de 1997 a 2012 houve 42 publicações. De 2013 a 2016, houve 73 publicações, quase o dobro da quantidade publicada nos primeiros 16 anos, o que mostra

que o interesse na impressão 3D para aplicações na construção civil começou a aumentar significativamente neste período (Tay *et al.*, 2017).

Alguns estudos selecionados estão apresentados no Quadro 2.1.

Quadro 2.1 – Síntese de estudos em impressão 3D (1)

<b>Autores</b>	<b>Rubio, Sonebi and Amziane, 2017</b>	<b>Le <i>et al.</i>, 2012</b>	<b>Kazemian <i>et al.</i>, 2017</b>	<b>Ma, Li and Wang, 2018</b>
<b>Proporção de cimento</b>	Cimento Portland CEMI 42,5N 33,3 a 50%	CEM I 52,5 25 a 45%	30%	P. O 42,5R 45%
<b>Proporção de cinzas volantes</b>	24%	20%	_____	20%
<b>Proporção de sílica de fumo</b>	8%	10%	0 a 10%	10%
<b>Tipo de agregado</b>	Areia	Areia	Areia	Cobre e areia
<b>Proporção agregado</b>	50% a 66,6%	75% a 55%	30%	Cobre 0 a 50%
<b>Relação água/cimento</b>	0,5%	37%	43 a 47%	27%
<b>Acelerador de presa</b>	_____	_____	_____	_____
<b>Superplastificante</b>	0,275 a 0,55%	0,5% a 1%	0,05 a 0,16% e 0 a 0,11	0,29%
<b>Fibras</b>	Polipropileno (PP) 6 mm de 0,2 a 0,6 %	Polipropileno (PP) 9 mm 1,2 kg/m <sup>3</sup>	Polipropileno (PP) 6 mm 0 a 1,18 kg/m <sup>3</sup>	Polipropileno (PP) 9 mm 1,2 kg/m <sup>3</sup>

Rubio, Sonebi and Amziane (2017) aplicaram uma proporção água/cimento de 0,5 e uma proporção ligante/agregado de 1:2 e 1:3. Além do cimento como ligante, foram utilizadas cinzas volantes e sílica de fumo, em diferentes proporções, além da inclusão de fibras de polipropileno. Ao fim de seus ensaios, observaram que a adição de fibras na proporção de 0,2% a 0,6% aumentou sua resistência, sua coesividade e tornou a mistura mais estável para não entrar em colapso com a deposição das camadas superiores. Mas, o resultado pode ser inverso caso a quantidade de fibras seja elevada. Quanto a adição de cinzas volantes e sílica de fumo nas proporções de 24% e 8% respectivamente, houve aumento da resistência no estado fresco, a homogeneidade e a estabilidade para imprimir, pois reduziu a segregação e o abaixamento.

Le *et al.* (2012) buscaram em 5 amostras identificar proporções ideais para a impressão em betão. A proporção de agregado/ligante com melhor resultado foi de 60% e 40% respetivamente, sendo que dos ligantes, 20% eram de cinzas volantes e 10% de sílica de fumo. O superplastificante ficou na casa de 0,5% a 1% do peso do ligante, e as fibras de polipropileno na proporção de 1,2 kg/m<sup>3</sup>. A resistência alcançada foi superior a 110 MPa em 28 dias, com bons resultados em trabalhabilidade da mistura que passava através de um bocal de 9 mm de diâmetro.

Kazemian *et al.* (2017) realizaram 4 amostras para impressão 3D por extrusão. Fixou-se uma proporção agregado ligante de 70/30, variando o ligante em uma única amostra com 10% de sílica ativa. Em outra amostra foram colocadas fibras na proporção de 1,18 kg/m<sup>3</sup> e noutra 0,30% de nano argilas. O estudo constatou que a sílica e a nano argila aumenta a estabilidade da mistura, o que não acontece com as fibras de polipropileno. Quanto a resistência a compressão, todos os traços (Quadro 2.1) tiveram ligeiro aumento aos 28 dias.

Ma, Li and Wang (2018) apresentaram um estudo com a incorporação de cobre ao agregado natural. Fixando a taxa em massa de 1,2 para agregado, foi adicionando cobre na taxa de 10%, 20%, 30%, 40% e 50%, sempre diminuindo essa massa do agregado fixado. A massa aglomerante foi de 1, dividindo em 0,7 para cimento, 0,2 para cinzas volantes e 0,1 para sílica ativa. A água foi fixada em 0,27 com o incremento de 3 %. Para finalizar, foram utilizadas 1,2 kg/m<sup>3</sup> de fibras de polipropileno. Os resultados obtidos mostraram que com percentagens de cobre de 40% ou mais tem baixa aplicabilidade para estruturas sobrepostas devido a sua alta capacidade de escoamento e baixa rigidez, e que a taxa de 30% se torna a com melhores resultados para extrusão, a qual necessitou de aproximadamente 1,1% de superplastificantes para se tornar fluida. Com adição de cobre o material apresentou diminuição na resistência.

No Quadro 2.2 são apresentadas mais algumas sínteses de estudos.

Quadro 2.2 – Síntese de estudos em impressão 3D (2)

<b>Autores</b>	<b>Jianchao <i>et al.</i>, 2017</b>	<b>Ji <i>et al.</i>, 2019</b>	<b>Lim <i>et al.</i>, 2012</b>	<b>Hambach and Volkmer, 2017</b>
<b>Proporção de cimento</b>	Cimento Sulfoaluminato e cimento Portland	Portland 42,5 14,66 a 15,67%	36% da massa total	40%
<b>Proporção de cinzas volantes</b>	_____	3 a 5 %	_____	_____
<b>Proporção de sílica de fumo</b>	_____	_____	_____	21%
<b>Tipo de agregado</b>	Areia	Areia e agregado grosso	Areia	Areia
<b>Proporção agregado</b>	_____	85,34% a 84,33%	54% da massa total	60%
<b>Relação água/cimento</b>	_____	60% a 66%	10% da massa total	40%
<b>Acelerador de presa</b>	_____	3 a 5%	_____	0,3%
<b>Superplastificante</b>	_____	_____	_____	2,5
<b>Fibras</b>	_____	_____	_____	Fibra de carbono D=7 C=3mm Fibra de vidro D=20 C=6mm Fibra de basalto D=13 C=6mm

Jianchao *et al.* (2017) abordaram em suas pesquisas dois tipos de cimento para o mesmo traço, o cimento Portland e o cimento sulfoaluminato. Para os ensaios foram utilizados agregados de tamanhos não superiores a 5mm, escórias de alto forno, além de aceleradores e retardadores de pega. Para atribuir elementos a sua pesquisa, foram analisadas as propriedades químicas dos elementos, assim buscando analisar a durabilidade com ensaios de impermeabilidade e resistência a carbonatação, resistência ao congelamento e ao descongelamento e o fluxo elétrico. Já as propriedades mecânicas foram verificadas através de resistência a tração e a compressão. Assim, os autores verificaram que o uso do cimento

sulfoaluminato se torna mais eficaz, devido ao seu curto tempo de presa inicial bem como mais elevadas propriedades de resistência inicial.

Ji *et al.* (2019) propuseram uma mistura na qual foi utilizado cimento Portland, buscando uma resistência C20 e C25. O estudo utilizou cimento Portland 42,5, agregado miúdo com módulo de finura 2,88, agregado graúdo com dimensões entre 5 e 15mm, cinzas volantes e acelerador de presa na proporção de 3% a 5%. Os parâmetros utilizados pelos autores para o C20, foi de 1 de cimento, 3,20 de areia, 3,62 de agregado graúdo, relação água cimento de 0,66. Já para o C25 as proporções foram de 1:2,98:3,4 respectivamente, com a relação água cimento de 0,60. Os resultados obtidos mostraram que os parâmetros de bombeamento e extrudibilidade foram atendidos, e uma perda de resistência de 2 MPa a 4 MPa no betão impresso.

Lim *et al.* (2012) realizaram uma mistura na qual compoetia 54% da sua massa de areia, 36% de materiais aglomerantes e 10 % de água. O estudo buscou analisar a capacidade de bombeamento, imprimibilidade, construtibilidade e o tempo de abertura. Observaram-se perda de até 20% na compressão do material, e, quanto a flexão não teve uma alteração significativa.

Hambach and Volkmer (2017) analisaram 3 tipos diferentes de fibras na impressão 3D em variados tipos de trajeto. Para isso os autores adotaram um traço padrão de 40% da massa de aglomerante e 60% de areia, numa relação água cimento de 0,4. As fibras utilizadas foram de carbono, com 7 mm de diâmetro de 3 mm de comprimento; fibra de vidro, com 20 mm de diâmetro e 6 mm de comprimento; fibra de basalto, com 13 mm de diâmetro e 6 mm de comprimento. Quanto a resistência a flexão, houve aumento de 3 MPa nas fibras de vidro e basalto, e um aumento de 20 MPa nas fibras de carbono. Quanto a compressão, com as fibras houve redução de tensão de até 20 MPa nos trajetos longitudinais, mas um aumento modesto nos perpendiculares. Por fim, os autores definem que para substituir o aço no que diz respeito a flexão, deveria se achar um modo de se incorporar mais que 1% do volume.

Com base nos estudos apresentados no Quadro 2.1 e no Quadro 2.2, criou-se uma noção das proporções dos elementos que constituem um elemento argamassado para a impressão 3D. A contribuição de adjuvantes como superplastificante, fibras e acelerador de presa, a proporção aglomerante/agregado e água/cimento. Observou-se também que a utilização de resíduos é aplicável como substituto ao agregado, por exemplo, o cobre, e também ao aglomerante, como as cinzas volantes e sílica de fumo.

## 3. Materiais, Equipamentos e Métodos

### 3.1. Materiais

Nesta seção são apresentados os materiais utilizados para a formulação da argamassa.

#### 3.1.1. Ligantes

O presente estudo trabalhou com dois tipos de materiais aglomerantes, o cimento Portland e a cinza volante, ambos os materiais foram fornecidos pela empresa Lena Agregados.

##### 3.1.1.1 Cimento Portland

O cimento utilizado foi do tipo CEM II/B-L 42,5 da marca Secil, que segundo o fabricante tem como principais características mecânicas a resistência a compressão aos 28 dias  $\geq 42,5$  e  $\leq 62,5$ . Sua composição apresenta entre 65% a 79% de clínquer Portland, 21% a 35% calcário e 0% a 5% de outros constituintes (NP EN 197-1, 2012). A ficha técnica do produto é apresentada no Anexo A.

##### 3.1.1.2 Cinza volante

A cinza volante utilizada foi do Tipo B com a classe N (sem co-combustão), tendo suas características apresentadas no Quadro 3.1.

Quadro 3.1 – Características da cinza volante

Características	Valor
Perda ao fogo (%)	$\leq 7$
Finura (%)	16 (VD)
Óxido de cálcio livre (%)	$\leq 1,6$
Óxido de cálcio total (%)	$\leq 10$
Cloretos (%)	$\leq 0,10$
Sulfatos (%)	$\leq 3$
Densidade das partículas (Kg/m <sup>3</sup> )	2 300 (VD)
Índice de atividade: (%) 28 dias 90 dias	$> 75 > 85$

A ficha técnica do produto é apresentada no Anexo B.

### 3.1.2. Agregados

Os agregados utilizados na pesquisa são de origem calcária (oriundo da região de Fátima/Portela), e de origem granítica (oriundo da região de Castelo de Vide), sendo cada um deles separados em duas granulometrias diferentes, menor que 2 mm, e menor que 1 mm. Tanto o pó de rocha calcária, quanto o pó de origem granítica foram fornecidos pela empresa Lena Agregados.

O material apresentado para a análise granulométrica é o pó de origem calcária menor que 1 mm, por este ser o mais empregado nos ensaios de extrusão.

O material ficou retido em estufa por 24 horas, e quando retirado, ficou esfriando por 2 horas. Após o processo de mistura e homogeneização, uma fração de 3 kg foi separada e levada para um peneirador mecânico, no qual permaneceu por 10 minutos.

O material retido nos peneiros de 2 mm, 1 mm, 0,500 mm, 0,250 mm, 0,125 mm, 0,063 mm e menor que 0,063 mm foram pesados e apontados para traçar a curva granulométrica. Repetiu-se este procedimento por 3 vezes. As fichas técnicas do ensaio são apresentadas no Anexo C.

A média dos três ensaios está apresentado no Quadro 3.2, partindo de uma massa seca total da amostra de 3000,0133 g.

Quadro 3.2 – Análise granulométrica em laboratório

Peneiros	Material Retido			% total que passa
	Abertura nominal (mm)	Massa (R1) G	Percentagem (m <sup>2</sup> /m <sup>1</sup> ) %	
4	0	0	0	100,00
2	0,35	0,01	0,01	99,99
1	0,92	0,03	0,03	99,96
0,500	556,38	18,55	18,57	81,38
0,250	1387,21	46,24	46,31	35,08
0,125	398,04	13,27	13,29	21,79
0,063	563,54	18,78	18,81	2,98
<0,063	89,16	2,97	2,98	0
	2995,6	99,85	100	

Sendo assim, a amostra média foi definida pelos parâmetros apresentados no Quadro 3.3.

Quadro 3.3 – Parâmetros da análise granulométrica

$(M_1 - M_2) + P / M_1 \times 100$	Percentagem de finos	2,97%
$m_f$	Massa final do provete	2995,60
$C = m_1 / m_f$	Coefficiente correção	1,00
$(M_2 - (R_1 + P) / M_2) \times 100$	Perda de material %	3,12%

Nota-se que a amostra, embora apresente cerca de 0,04% de massa retida nos peneiros superiores a 1 mm, a grande maioria do material se encontra entre meio milímetro e um quarto de milímetro. A curva granulométrica esta apresentada na Figura 3.1.

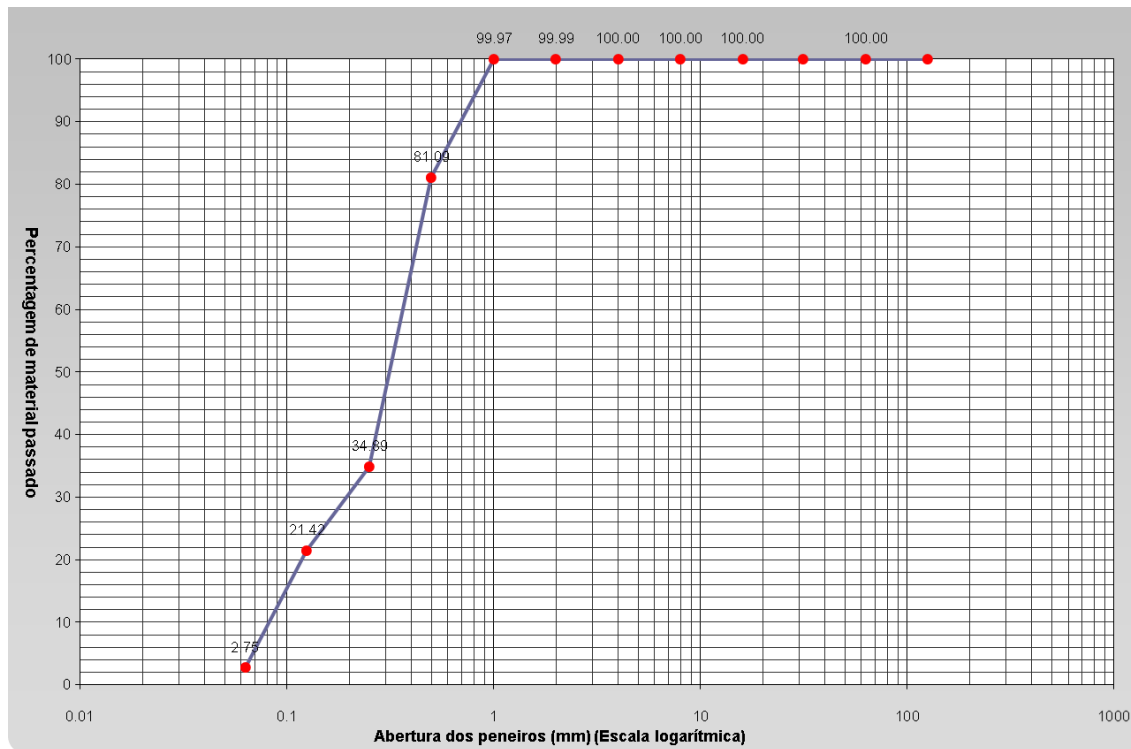


Figura 3.1 – Resultado da curva granulométrica

### 3.1.3. Adjuvantes

Nesta pesquisa são utilizados três tipos de adjuvantes, os superplastificantes, os aceleradores de presa e as fibras.

#### 3.1.3.1 Superplastificante

O superplastificante utilizado é da marca Sika ViscoCrete – 1143, que tem o seu uso recomendado pelo fabricante entre 0,5% a 2,0% do peso de aglomerante. Tem sua base química uma mistura de Policarboxilatos e um teor de cloreto  $\leq 0,1\%$ . Segundo dados do fabricante promove a melhoria da impermeabilidade, aumento da resistência mecânica e diminui a segregação. A ficha técnica deste produto está apresentada no Anexo D.

### 3.1.3.2 Acelerador de presa

O acelerador de presa utilizado foi o MasterX-Seed 130, sendo ele um agente ativador da hidratação do cimento que aumenta sua resistência, tanto na fase inicial, quanto na fase final. A dosagem recomendada pelo fabricante é de 1% a 3% sobre o peso do aglomerante. Seu teor de cloretos é  $< 0,01\%$ . A ficha técnica deste produto está apresentada no Anexo E.

### 3.1.3.3 Fibras

As fibras utilizadas são da marca FIBTEX REPSOL Classe II, sendo elas de polipropileno com diâmetro médio de  $31 \mu\text{m}$  e tendo um comprimento médio de  $12,9 \text{ mm}$ . Sua recomendação de uso pelo fabricante é de  $0,6 \text{ kg/m}^3$  de betão. Seu certificado de qualidade está apresentado no Anexo F.

## 3.2. Equipamentos

Nesta secção são apresentados os dois equipamentos utilizados para a extrusão da argamassa, para a criação das peças em 3D. Para ambos os sistemas os equipamentos de posicionamento e controlo são os mesmos, sendo eles:

- Um braço robótico Yaskawa Montoman HP20F, com carga útil de 20 kg. O braço possui seis eixos de rotação, rotação e torção, podendo eles ser observados na Figura 3.2.

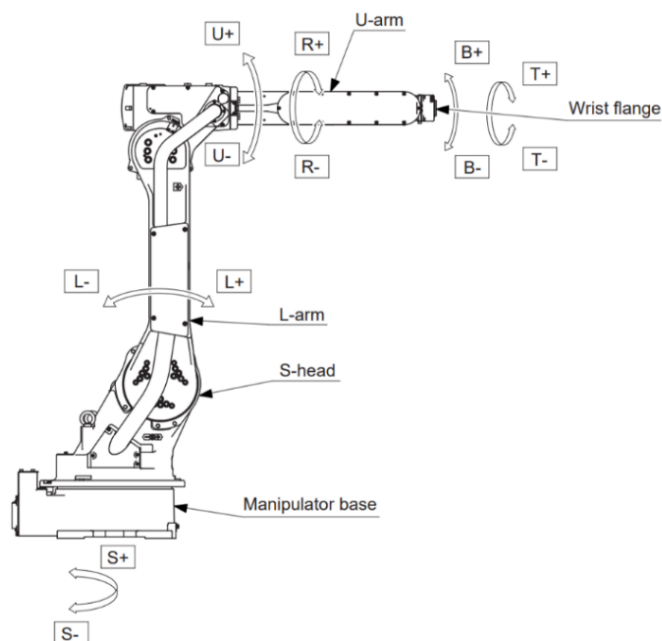


Figura 3.2 – Braço robótico Yaskawa Montoman HP20F

- Um controlador do braço robótico FS100 que está programado para fazer o braço seguir o caminho da peça a ser extrudida.

A peças foram desenhadas e a programação foi efetuada pelo fatiamento do modelo CAD 3D, por camadas com altura pretendida e são guardados pontos de intersecção, sendo assim, dividido por camadas planas perpendiculares ao eixo vertical, eixo z, separadas por uma altura “h”. Assim é criada uma nuvem de pontos sequenciais e contínua. Esta discretização é necessária devido à linguagem de programação, que, tal como no código G, o robô apenas reconhece as posições e executa as interpolações entre os diversos pontos.

### 3.2.1. Equipamento para peças de pequena dimensão

O sistema de extrusão das impressões de pequena dimensão (Figura 3.3) é composto por uma cabeça de impressão para materiais cimentícios acoplada ao braço robótico. Deste sistema faz parte um cilindro de armazenamento de 5 litros para argamassa que alimenta o bico de extrusão de argamassa através de um pistão que se move por pressão do ar. O cilindro de armazenamento é feito em alumínio, possuindo um pistão interior, fechado nos topos superior e inferior, com suportes de alumínio e componentes *Kemlock* para facilitar e proteger o sistema de fecho. O bico de extrusão é accionado por um motor elétrico com extrusão contínua.



Figura 3.3 – Sistema de extrusão de impressões de pequena dimensão

Neste sistema, a mistura das argamassas foi realizada usando um misturador de argamassa (Figura 3.4). Os componentes da misturas foram pesados e adicionados num recipiente de 10 litros, onde foram misturados até ficarem homogêneos e introduzidos no cilindro para ser extrudido.



Figura 3.4 – Misturador de argamassa

### 3.2.2. Sistema de impressão de grande dimensão

O equipamento utilizado consiste em uma misturadora de 100 litros que deposita a mistura pronta numa bomba que eleva a argamassa através duma mangueira até à cabeça de extrusão, inserida braço robótico modelo Yaskawa Monto-man HP20F com carga útil de 20 kg, e com seis eixos de rotação. A cabeça de extrusão, desenvolvida no CDRSP em colaboração com a empresa Periplast, é acionada através de um motor elétrico, possuindo a possibilidade de ajustar o caudal de extrusão e um bico de extrusão de 20 mm de diâmetro conforme Figura 3.5.



Figura 3.5 – Sistema de impressão de grande dimensão

### 3.3. Métodos

A principal dificuldade no desenvolvimento de um material para ser impresso é que este seja adequado ao equipamento, permitindo a sua extrusão, e que proporcione a construção do objeto pretendido, sendo dois desafios contraditórios que devem ser cumpridos em três passos. Primeiramente, o material deve estar suscetível a ser extrudido através de uma, ou mais cabeças extrusoras e mantendo a sua forma, uma vez depositadas sobre a cama de impressão. No segundo passo, as camadas depositadas não devem entrar em colapso, degradar, ou desmoronar sob a carga das camadas seguintes. No terceiro passo, deve ser assegurada uma boa união entre as camadas de melhores propriedades endurecidos (Panda, Chandra Paul and Jen Tan, 2017); (Kazemian *et al.*, 2017).

#### 3.3.1. Ensaios de impressão para estudo da composição da argamassa

##### 1ª fase - estrutura com paredes verticais

Para realizar um estudo da composição de argamassa foram realizadas impressões de pequena dimensão com a geometria de um quadrado perfeito com paredes verticais, procurando a verificação da adequação de misturas e aperfeiçoamento do equipamento, em busca do melhor processo de impressão. O modelo 3D original é apresentado na Figura 3.6.

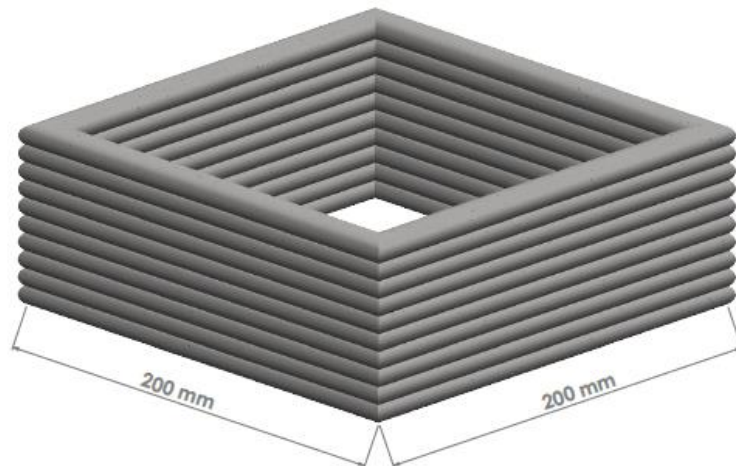


Figura 3.6 – Estrutura com paredes verticais

Cada tipo de mistura deste processo, é constituída por uma composição diferente, designada pela letra S seguida por um número de ordem. As misturas são apresentadas no Quadro 3.4.

Quadro 3.4 – Misturas da estrutura com paredes verticais

Mistura/parâmetros	S1	S2	S3	S4	S5
Tipo de agregado/diâmetro máximo	Pó de Fátima (1mm)	Pó de Granito (2 mm)	Pó de Fátima (1mm)	Pó de Fátima (1mm)	Pó de Granito (1 mm)
Proporção ligante/inerte (%)	40/60	40/60	50/50	60/40	50/50
Proporção cimento/cinzas (%)	75 / 25	75 / 25	75 / 25	75 / 25	75/25
Relação água/cimento (%)	41	45	35	30	39
Superplastificantes (%)	0,5	0,5	1	1	1
Acelerador de presa (%)	0	0	0	0	0

Os parâmetros alterados no equipamento de impressão alteram a extrudibilidade, a largura e a altura do filamento, assim como o tempo em aberto que cada mistura demorou para começar a ser extrudida (Quadro 3.5).

Quadro 3.5 – Parâmetros do equipamento de impressão da estrutura com paredes verticais

Mistura/parâmetros	S1	S2	S2 <sup>2</sup>	S3	S3 <sup>2</sup>	S4	S5	S5 <sup>2</sup>
Tempo em aberto (min)	6	7	20	7	20	10	10	23
Frequência (Hz)	60	30	60	30	30	40	40	40
Velocidade (mm/s)	30	50	50	30	30	30	30	20
Pressão (bar)	4	4	4	4	4	3	3	4
Largura da camada (mm)	33,4	34,8	43,5	26,3	29,8	18,59	24,71	27,71

(2) Mesma composição com parâmetros de impressão diferentes.

## 2ª fase – estrutura com paredes inclinadas

Nesta fase foi realizada a impressão de um quadrado com os filamentos desfasados, procurando identificar o limite de inclinação das paredes assim produzidas e também a otimização das misturas e resultados de impressão através de ajustes na impressora. Neste ponto foi realizada a impressão com paredes inclinadas de 7°, 10,5°, 14° e 17,5°, assumindo cada camada um desfasamento sucessivo de 1; 1,5; 2 e 2,5 mm para o lado externo em cada camada do quadrado, conforme a Figura 3.7.

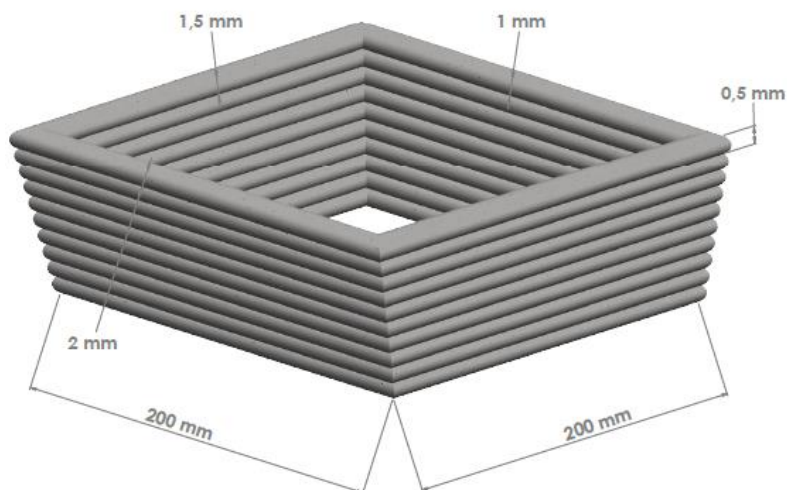


Figura 3.7 – Estrutura com paredes inclinadas

A impressão de quadrados com desfaseamento obteve a denominação D, acompanhada do respectivo número de ordem, conforme apresentado no Quadro 3.6 e no Quadro 3.7.

Quadro 3.6 – Misturas da estrutura com paredes inclinadas <sup>(1)</sup>

Mistura/parâmetros	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7
Tipo de Agregado/diâmetro máximo	Pó de Fátima (1mm)	Pó de Fátima (1mm)	Pó de Fátima (1mm)	Pó de Fátima (1mm)	Pó de Fátima (1mm)	Pó de Fátima (1mm)	Pó de Fátima (1mm)
Proporção ligante/inerte (%)	50/50	50/50	40/60	50/50	50/50	50/50	50/50
Proporção cimento/cinzas (%)	75 / 25	75 / 25	75 / 25	75 / 25	75/25	75/25	75/25
Relação água/cimento (%)	35	35	41	36	40	36	34
Superplastificantes (%)	1	1	1	1	1	1	1.5
Acelerador de presa (%)	0,5	0	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5

Quadro 3.7 – Misturas da estrutura com paredes inclinadas (2)

Mistura/parâmetros	D8	D9	D10	D11	D12	D13	D14
Tipo de agregado/diâmetro máximo	Pó de Fátima (1mm)	Pó de Fátima (1mm)	Pó de Fátima (1mm)	Pó de Fátima (1mm)	Pó de Fátima (1mm)	Pó de Fátima (1mm)	Pó de Fátima (1mm)
Proporção ligante/inerte (%)	50/50	50/50	40/60	50/50	50/50	50/50	50/50
Proporção cimento/cinzas (%)	80/20	70/30	65/35	60/40	70/30	70/30	70/30
Relação água/cimento (%)	36	36	36	36	36	38	37
Superplastificantes (%)	1	1	1	1	1	1	1
Acelerador de presa (%)	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Fibras (%)	-	-	-	-	0,6	0,5	0,4

Assim como no quadrado perfeito, as impressões com desfasamento tiveram aperfeiçoamento do sistema, sendo esses dados apresentados no Quadro 3.8 e no Quadro 3.9.

Quadro 3.8 – Parâmetros do equipamento de impressão da estrutura com paredes inclinadas (1)

Mistura/parâmetros	D1	D2	D3	D4	D4 <sup>2</sup>	D5	D6	D7
Tempo em aberto (min)	13	19	6	18	18	18	24	9
Frequência (Hz)	40	40	60	30	40	30	40	40
Velocidade (mm/s)	30	50	30	40	30	60	30	60
Pressão (bar)	3,5	3,5	4	2	2	2	3	3
Largura da camada (mm)	22,74	22,73	33,4	-	-	-	25	20

Quadro 3.9 – Parâmetros do equipamento de impressão da estrutura com paredes inclinadas (2)

Mistura/parâmetros	D8	D9	D10	D11	D12	D13	D14
Tempo em aberto (min)	13	18	10	11	18	18	12
Frequência (Hz)	30	30	300	30	30	30	30
Velocidade (mm/s)	40	40	40	40	40	40	40
Pressão (bar)	3	3	3	3	3	3	3
Largura da camada (mm)	20	20	-	20	13	30	2,5

### 3.3.2. Consistência por espalhamento e vida útil

As propriedades de consistência da argamassa foram realizadas em laboratório, sendo o ensaio com mais resultados sobre a argamassa fresca. O ensaio foi realizado com o equipamento apresentado na Figura 3.4, e com um misturador mecânico (Figura 3.8) de acordo com as recomendações da norma EN 196-1 (2016) do Comité Europeu de Normalização.



Figura 3.8 – Misturador de argamassa mecânico

As propriedades frescas medidas foram a consistência e a vida útil como parâmetros de calibração para uma boa capacidade de extrusão e impressão. A consistência das misturas foi medida de acordo com a norma EN 1015-3 (1999) onde um molde foi completamente preenchido de argamassa, em duas camadas, onde cada camada recebeu 10 pancadas com o pilão de compactação. Posterior as duas camadas serem compactadas, esperou-se 15 segundos e retirou-se o molde lentamente, aplicando 15 golpes em 15 segundos numa mesa de espalhamento e mediu-se o diâmetro. Se o espalhamento for menor que 14 cm é considerada uma mistura seca, se for maior que 20 cm é considerada uma mistura fluída. Se a argamassa após os 15 golpes ficar num intervalo entre 14 cm e 20 cm é considerado uma argamassa plástica (EN 1015-3, 1999). Os resultados obtidos estão expressos no Quadro 3.10.

**Quadro 3.10 – Espalhamento da argamassa**

<b>Mistura</b>	<b>Resultado (cm)</b>
<b>D1</b>	16,33
<b>D2</b>	18,83
<b>D3</b>	17,66
<b>D4</b>	16,5
<b>D5</b>	18,75
<b>D6</b>	14,33
<b>D7</b>	14
<b>D8</b>	17
<b>D9</b>	17
<b>D10</b>	16,75
<b>D11</b>	16,75
<b>D12</b>	16

A vida útil de acordo com a norma EN 1015-9 (1999), consiste em empregar a mesma mistura e o mesmo processo descrito acima a cada 15 minutos, medindo se houve uma redução igual ou superior a 3 cm em sucessivas medições. Os ensaios foram realizados em laboratório, sendo os resultados obtidos apresentados no Quadro 3.11.

**Quadro 3.11 – Tempo em aberto**

<b>Mistura</b>	<b>Tempo em aberto (min)</b>
<b>D1</b>	15
<b>D8</b>	30
<b>D9</b>	30
<b>D10</b>	30
<b>D11</b>	15
<b>D12</b>	15

### **3.3.3. Resistência mecânica**

Nestes ensaios foram doseadas as frações de cada componente em balança de precisão, como pode-se observar na Figura 3.9 – A. Depois as misturas foram colocadas em uma mesa de consistência, de acordo com a EN 1015-3, e depois colocadas em moldes de formato 4x4x16 cm e levadas para uma mesa vibratória (Figura 3.9 – B). Após 24 horas, as misturas foram desmoldadas e colocadas em um tanque de cura até completar a idade de 28 dias.



Figura 3.9 – Balança de precisão e mesa vibratória

Os ensaios de flexão e compressão foram executados aos 28 dias de idade, sendo o ensaio de flexão efetuado com um equipamento próprio (Figura 3.10), de três pontos, onde duas servem de apoio e são distanciadas em 10 cm, e a terceira emprega uma carga crescente que atua até o provete se romper, sendo sua formulação expressa através da Equação 3.1.

$$R_f = \frac{1,5 \cdot F_f \cdot L}{40^3} \quad (3.1)$$

Onde:

$R_f$  = resistência à flexão;

$F_f$  = força aplicada (N), necessária para romper o provete;

$L$  = distância entre os suportes (mm).



Figura 3.10 – Ensaio de flexão

Já para o ensaio de compressão, os mesmos provetes foram usados considerando para o ensaio uma área de 4x4 cm (Figura 3.11), totalizando 6 provetes a serem ensaiados com a aplicação de uma força, sendo a expressão obtida para o cálculo conforme a Equação 3.2.

$$R_c = \frac{F_c}{1600} \quad (3.2)$$

Onde:

$R_c$  = resistência à compressão;

$F_c$  = força aplicada (N), necessária para romper o provete.



Figura 3.11 – Ensaio de compressão

#### 3.3.4. Impressão de um banco

Ao definir a melhor mistura, o objetivo foi aumentar a produtividade da impressão. O estudo buscou a impressão de um banco, conforme apresentado na Figura 3.12, que consiste em um mobiliário urbano e um projeto mais complexo, devido ao tamanho da peça.



Figura 3.12 – Impressão do banco

O processo de impressão apresentou 3 códigos diferentes. Entre a 1ª camada e 23ª camada, concebeu-se o código da Figura 3.13 – A, permitindo o suporte da tábua de madeira para o assento, contendo 11471,09 mm/camada. Entre a 24ª camada até 48ª camada, elaborou-se o código da Figura 3.13 – B, contendo 8695,696 mm/camada, e permitindo o encaixe e a fixação da placa de madeira, terminando a última camada com o código da Figura 3.13 – C, com 4090 mm, para uma melhor utilização e manutenção da floreira, gerando uma invisibilidade da estrutura interior, com um total de 49 camadas.

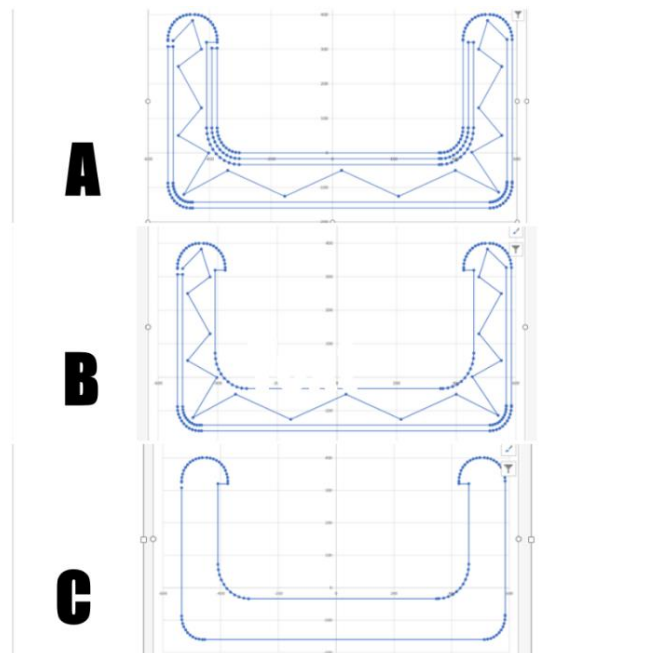


Figura 3.13 – Processo de impressão

Ao final da impressão, o projeto apresentaria uma aparência conforme a Figura 3.14. O projeto visou um procedimento limpo e contínuo, sem interrupções da máquina.

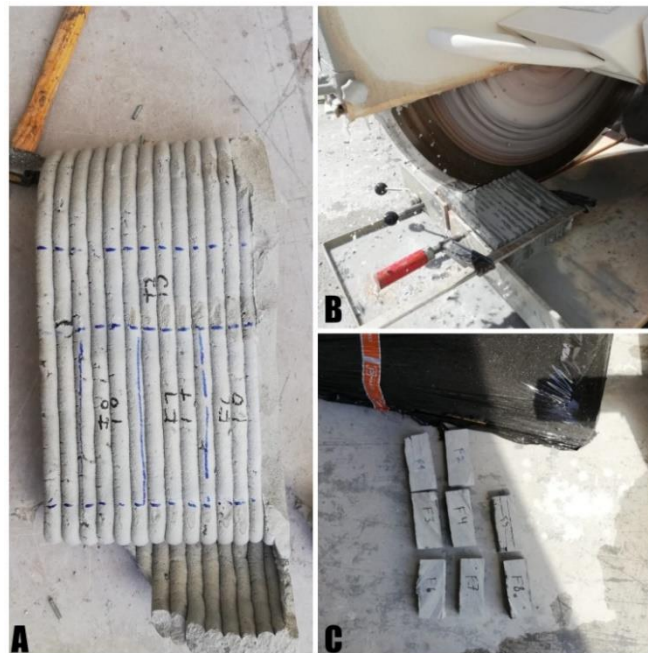


**Figura 3.14 – Aparência final da impressão**

A mistura utilizada foi a D9, e os processos de impressão do Robô, foram alterados. Sendo assim os parâmetros utilizados foram de 50 mm/s, com uma velocidade de rotação do motor de 70 mm/s. A largura de cada *layer* foi de aproximadamente 23 mm com altura de 15 mm. Estes parâmetros foram usados nos 491 metros totais da peça.

### **3.3.5. Extração e ensaios mecânicos de elementos impressos**

Quando os testes de larga escala foram realizados, selecionou-se e levou-se uma peça para o laboratório (Figura 3.15), para esta ser cortada e analisada quanto a resistência mecânica do elemento. Ao todo, foram realizados 8 provetes ensaiados conforme a EN 1015-3 (1999). O processo de cura foi ao ar livre, e os ensaios foram realizados na idade de 28 dias (Figura 3.16), levando em consideração as Equações 3.1 e 3.2.



**Figura 3.15 – Peça selecionada para ensaio em laboratório**



Figura 3.16 – Análise da resistência mecânica do elemento na idade de 28 dias

### 3.3.6. Ensaio de tração entre filamentos

A extração dos elementos para o ensaio de tração foi realizada do mesmo jeito que para o ensaio de resistência mecânica dos elementos impressos.

Ao serem selecionados os provetes (Figura 3.17), 3 foram destinados ao ensaio de tração por rutura na direção do filamento, e 3 foram destinados a rutura a 90° do filamento.



Figura 3.17 – Provetes selecionados para ensaio de tração entre filamentos

A Figura 3.18, apresenta o modo de rutura do sentido do filamento, onde as chapas foram coladas com uma cola epóxi, e tracionadas através de uma máquina *Instron* 4505. A rutura se deu toda e exclusivamente através da união dos filamentos.

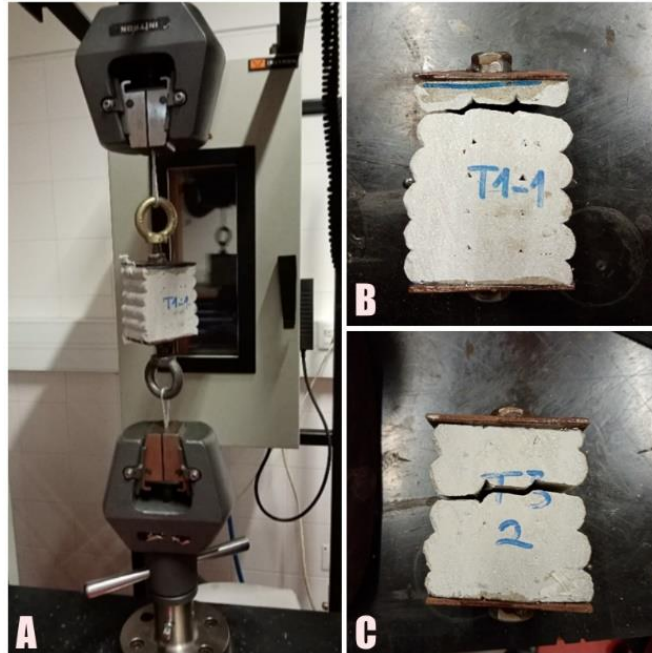


Figura 3.18 – Ruptura no sentido do filamento

Já os ensaios para tração a 90° do filamento, o elemento teve de ter sua área de contato diminuída, devido ao fato de os primeiros ensaios realizados aos provetes obterem, única e exclusivamente, rutura na cola de fixação das chapas (Figura 3.19).

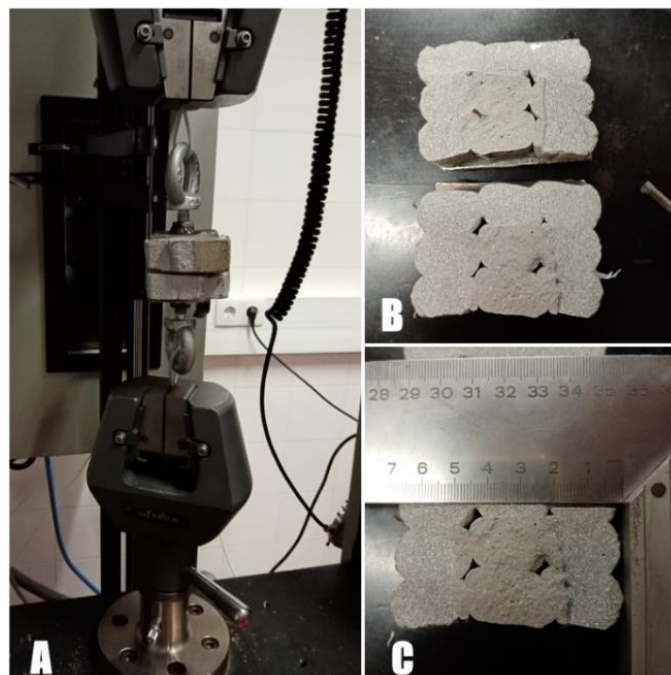


Figura 3.19 – Ruptura a 90° do filamento

Ao final do ensaio no equipamento, a área de contato foi determinada através do *Software AutoCad*, conforme Figura 3.20.

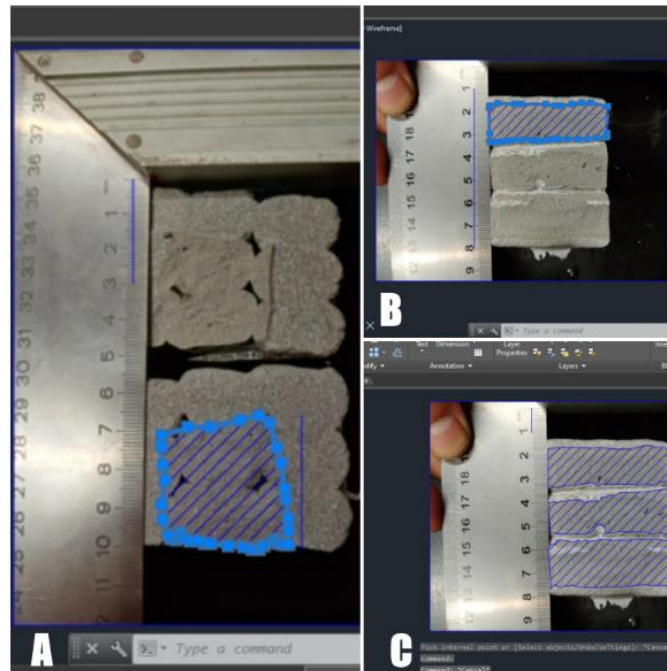


Figura 3.20 – Área de contato

Através do resultado da área e da tabela fornecida pela *Instron 4505*, que apresenta o tempo, a carga e a extensão, a tensão foi realizada através da Equação 3.3.

$$\sigma = \frac{N}{A} \quad (3.3)$$

Onde “N” é a carga retirada da tabela fornecida pela *Instron 4505* e “A” a área obtida pelo *Software AutoCad*.

Para a extensão o valor fornecido pela *Instron 4505* é dividido pela altura do provete (H) para obter um gráfico de tensão *versus* extensão. Posteriormente são analisados os resultados para obter o módulo de elasticidade do provete.

O módulo de elasticidade é fornecido pela Equação 3.4.

$$E = \frac{(\sigma_2 - \sigma_1)}{(\epsilon_2 - \epsilon_1)} \quad (3.4)$$

Note-se que este módulo de elasticidade não caracteriza o material, no entanto serve de comparação entre os valores obtidos nas direções perpendicular a paralela à junta.

### 3.3.7. Ensaio de compressão da argamassa fresca

Por requerer uma excelente resistência inicial já no início do processo de impressão, este ensaio buscou trazer o módulo de elasticidade do betão na idade de 15 min (tempo que o processo de impressão começou a ser realizado). Para isso, foi preparado um molde de PVC, com duas braçadeiras metálicas, contendo o 7 cm de diâmetro e 14 cm de altura, na qual foi adicionada a argamassa, na sua composição D9, e levou-se a *Instron 4505*, com uma célula de carga de 5 kN e uma velocidade de 30 mm/min. Ao ser depositado no local de ensaio, 4 pontos foram realizados e anotados, e assim, a máquina começou o trabalho de compressão (Figura 3.21).

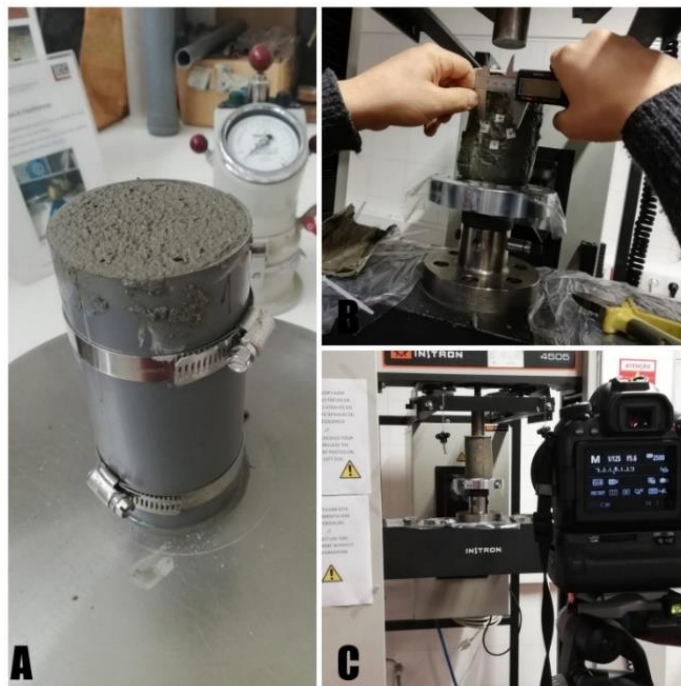


Figura 3.21 – Módulo de elasticidade do betão na idade de 15 min

Ao começar o trabalho de compressão, uma máquina fotográfica de alta resolução programada para tirar 1 foto por segundo começou a operar. Ao final do ensaio, os dados apresentados pela *Instron 4505* são exportados para o *Software Excel*. As fotos retiradas foram transformadas em um vídeo num editor, e após isso utilizou-se o *Software Kinovea* para registrar os deslocamentos dos pontos anotados (Figura 3.22). O *Software Kinovea*, possibilitou a marcação dos pontos em coordenadas, onde pode-se analisar os movimentos em cada segundo, transformando-os em ficheiros no *Software Excel*.

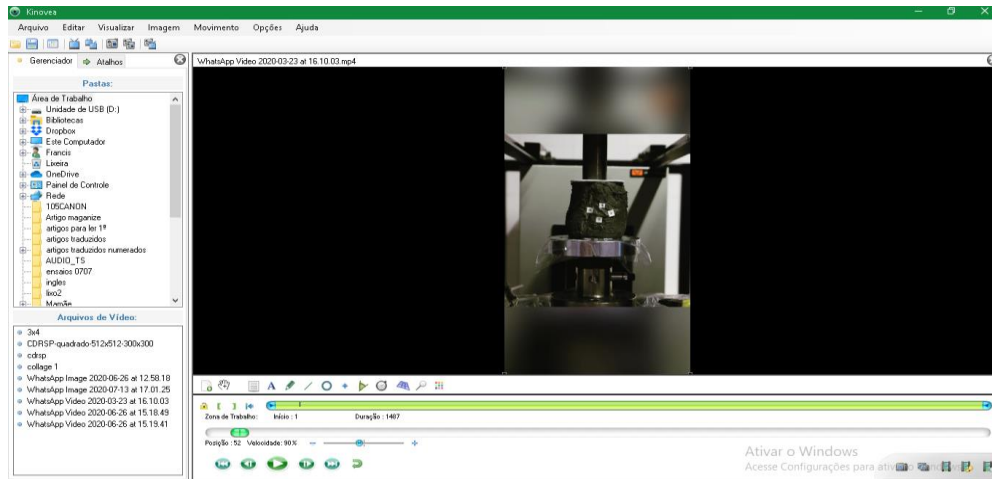


Figura 3.22 – Deslocamentos dos pontos no *Software Kinovea*

Assim, com a obtenção dos deslocamentos através de uma força de compressão constante, foi possível obter o módulo de elasticidade da argamassa.

### 3.3.8. Ensaio de corte com argamassa na idade inicial

O ensaio de corte foi realizado no Laboratório de Geotecnia e Vias de Comunicação (LGVC) do Politécnico de Leiria, onde a mistura denominada D9 foi levada ao misturador mecânico (Figura 3.8) e deixada em descanso durante um período de 15 min, que era a idade inicial de extrusão da mistura.

Após a mistura ser realizada, a argamassa foi introduzida num molde quadrado com área de  $0,0036 \text{ m}^2$ , e após ser devidamente compactada com o pilão, o provete foi pesado e levado a uma máquina de corte, conforme a Figura 3.23 – C, dando início ao teste.

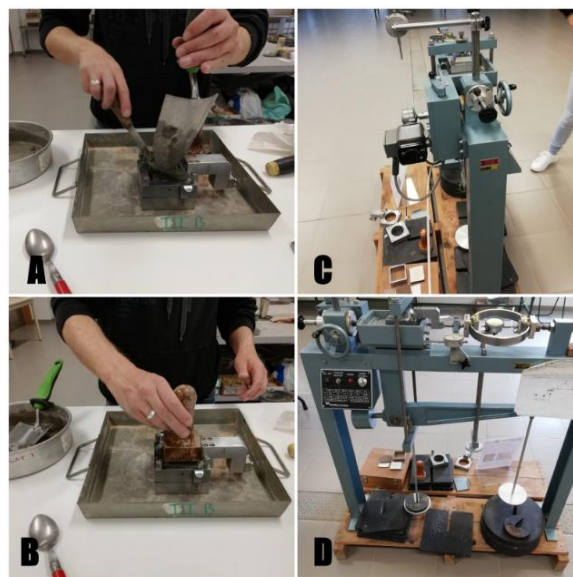


Figura 3.23 – Ensaio de corte

A velocidade de corte foi de 2mm/min, o fator de calibração do anel foi de 1379 N e a carga aplicada ao provete variou entre dois valores diferentes. Teve-se a carga nula e a carga com o peso de suporte (4,8 kg) com um 1 kg.

As leituras de cada ensaio foram realizadas em intervalos de 15 segundos, sendo estes medidos o deslocamento horizontal e a força de corte.

### 3.3.9. Modelação de elementos finitos

Através dos resultados obtidos nos resultados com a pasta fresca, os modelos estruturais foram realizados no *Software Robot* composto por elementos finitos quadriláteros de 4 nós, para conseguir compreender os resultados obtidos nas impressões. Os dados inseridos no *Software* são apresentados na Figura 3.24. Após a inserção dos dados, a modelação teve como alvo dois modelos: a estrutura com paredes inclinadas; e o banco até sua 15ª camada, para entender a razão da rotura na primeira tentativa de impressão.

Definição de material			
Aço Concreto Alumínio Madeira Outros			
Nome:	banco	Descrição:	Banco
<b>Elasticidade</b>			
Módulo de Young, E:	214.00	(kPa)	
Coeficiente de Poisson, ν:	0.3		
Módulo de cisalhamento, G:	13830.00	(kPa)	
<b>Resistência</b>			
Características:	25000.00	(kPa)	
Amostra:	Cilíndrico		
<b>Outros</b>			
Peso específico (peso unitário):	26.00	(kN/m <sup>3</sup> )	
Coef. de expansão térmica:	0.000010	(1/°C)	
Relação de amortecimento:	0.15		

Figura 3.24 – Dados do betão

#### Modelação da impressão com paredes inclinadas:

Como observado na impressão com paredes inclinadas, o limite estudado foi de 2 mm, ou 17,5°, sendo assim, para analisar um futuro aumento e justificar a falhas de algumas impressões, foi realizado um modelo 3D de elementos finitos dos provetes impressos com desfaseamento, conforme apresentado na Figura 3.25, para modelar a forma dos espécimes ilustrada na Figura 3.7, com o objetivo de avaliar tensões nas amostras impressas.

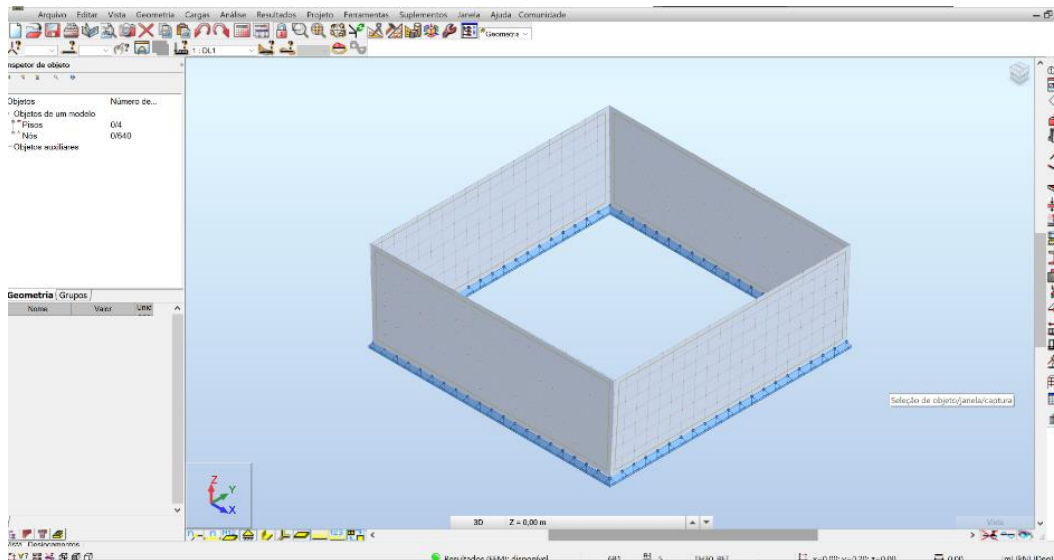


Figura 3.25 – Modelo 3D de elementos finitos

As propriedades do material do betão fresco foram consideradas elásticas lineares. O módulo de elasticidade aumenta com o aumento da idade do betão. Neste modelo numérico, um módulo de elasticidade foi considerado igual a 214 kPa, de acordo com o ensaio de compressão realizado com a pasta fresca. Porém, na análise realizada, o módulo de elasticidade não teve impacto significativo nas tensões obtidas neste modelo. O coeficiente de Poisson utilizado foi de 0,3.

#### Modelação da impressão do banco:

Essa modelação buscou entender o motivo da rutura na primeira tentativa de impressão, na altura de 15 camadas, seguindo o modelo da Figura 3.13. A Figura 3.26 apresenta a modelação no *Software Robot*, onde a altura de cada camada é de 15 mm e a largura de cada filamento de 23 mm.

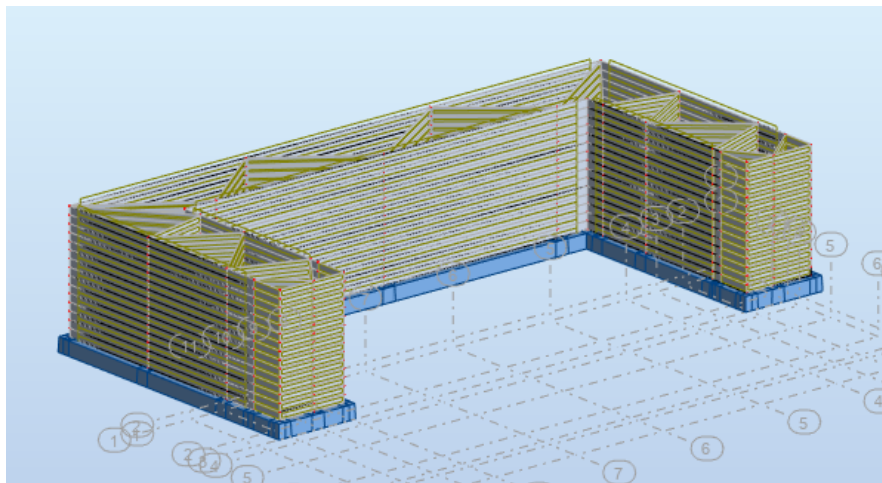


Figura 3.26 – Modelação no *Software Robot*

## 4. Resultados

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos através dos ensaios laboratoriais e de modelação desenvolvidos na secção 3.3.

### 4.1. Ensaio de impressão para estudo da composição

#### 1ª fase - estrutura com paredes verticais

Como já observado na secção 3.1.2, este ensaio levou em consideração dois tipos de agregados, o pó de rocha calcária e o pó de rocha granítica. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 4.1.

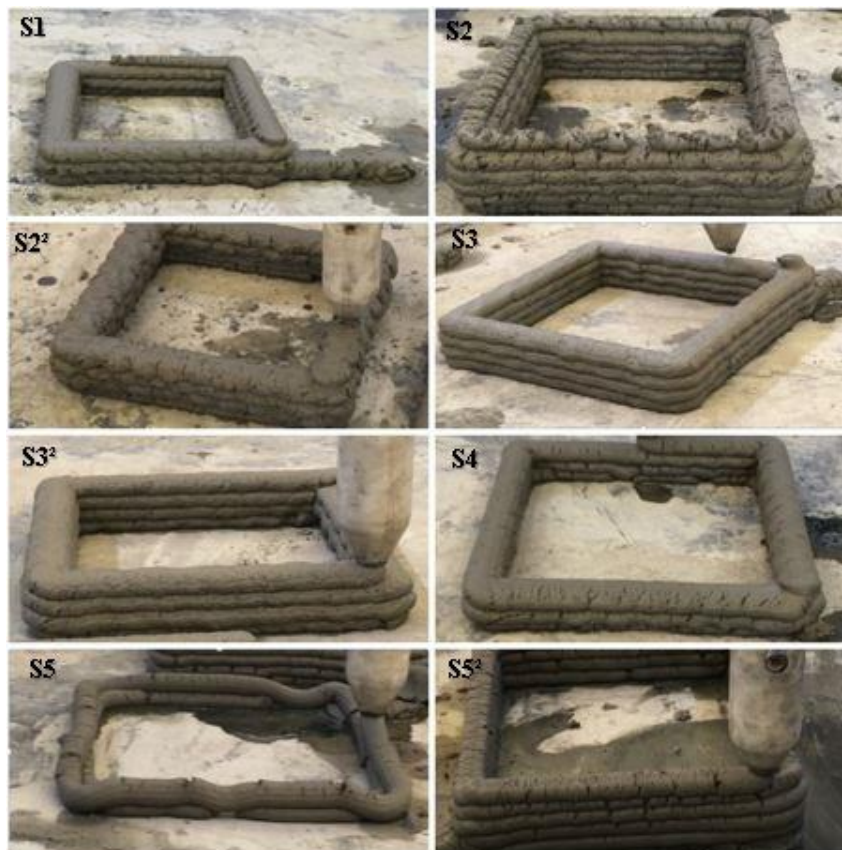


Figura 4.1 – Resultados de impressão da estrutura com paredes verticais

A mistura denominada por S1, com base no estudo de *Le et al.* (2012) contendo 40% a 60% de aglutinante/agregados, teve um bom desempenho com rocha calcária e sua extrudabilidade foi eficaz, apresentando uma boa aparência visual. No entanto, a mistura teve uma alta proporção da relação água/cimento, uma relação de 41% na mistura.

A mistura denominada S2, também tem como base estudo de Le *et al.* (2012) na mesma proporção que continha em sua composição rocha granítica inferior a 2 mm. A mistura apresentava segregação nos filamentos, causando uma má apresentação visual em seu primeiro teste. Já no segundo teste, com a mesma mistura, com uma variação do tempo em aberto e alterações nas configurações de impressão, a mistura apresentou melhor desempenho, mas continuou porosa, seu acabamento na face exterior ao *layer* apresentou ranhuras, o que indicou uma necessidade maior do tempo em aberto da mistura. Percebe-se pelo Quadro 3.5, que o aumento da frequência em Hz e a diminuição da velocidade de impressão apresentam um aumento na largura do filamento. A relação água/cimento foi de 45%, e por consequência a uma impressão sem sucesso, este agregado foi retirado para ensaios futuros.

Na mistura denominada S3 voltou-se a trabalhar com pó de Fátima, que apresentou melhores resultados, mas com proporção aglomerante agregado de 50%. A mistura apresentou melhoria na sua aparência visual e em sua trabalhabilidade. As duas formas impressas tiveram sua variação na pressão do embolo do robô, alterando em pouco a largura de suas camadas, mas mantendo a boa trabalhabilidade e aspeto visual.

Assim, na mistura S4, optou-se por elevar a proporção de aglomerantes para 60% da mistura. Foi o ensaio com menor relação água/cimento trabalhada, com 30%. Os resultados mostraram uma pasta mais firme, e com maior dificuldade de extrusão que a mistura S3, com 50% de aglomerante. No aspeto visual a mistura apresentou ranhuras, e faixas de segregação. Sendo a mistura com maior proporção de aglomerante, e assim, a proporção economicamente menos interessante, a proporção de 60%/40% de aglomerante/agregado não foi mais estudada.

A mistura denominada S5 teve como seu aglomerante a rocha granítica, com diâmetro máximo de 1 mm. Embora não tendo a maior relação água das amostras apresentadas, a argamassa apresentou problemas durante sua impressão. Sendo o agregado composto por grande quantidade de finos, a mistura apresentou um tempo em aberto muito menor que as demais e ao ser introduzida no embolo a mistura apresentou exsudação. A rigidez inicial na extrusão apresenta uma série de dificuldades, como fissuração do filamento não formando uma base adequada para as camadas seguintes. Após o início com pouca pressão no embolo, foi elevada a pressão ao máximo que o sistema permite (4 bar), reduzindo a velocidade de

impressão para 20 mm/s para que assim desse tempo para a camada ser depositada sem ocorrer rutura da mesma.

A proporção aglomerante/agregado que melhor se adequou ao processo de impressão apresentado foi a de 50/50%. O aumento do superplastificante evidencia uma diminuição na proporção água/cimento. Em relação aos agregados, o que apresentou melhor resultado, é o pó de rocha calcária com dimensões inferiores a 1 mm. Em relação ao aperfeiçoamento do robô para o processo de impressão, notou-se que quanto maior a velocidade de impressão e maior a frequência de rotação do motor, menor a largura do filamento. A pressão do embolo do motor apresentou pouca variação no estudo, mas interferiu diretamente na quantidade de argamassa enviada ao motor.

Sendo assim, para a sequência do estudo alguns parâmetros foram fixados, como o tipo de agregado (pó de rocha calcária menor que 1mm) e a proporção de aglomerante/agregados (50%/50%).

#### 2ª fase – estrutura com paredes inclinadas

Nestes ensaios de impressão, foram ensaiadas as composições apresentadas no Quadro 3.6 e no Quadro 3.7. Os resultados obtidos até a mistura D7 são apresentados na Figura 4.2



Figura 4.2 – Resultados de impressão da estrutura com paredes inclinadas (1)

A mistura denominada D1 apresentou resultados com bom aspecto visual no início, que poderiam à partida ser melhorados diminuindo o tempo em aberto entre o fim da mistura e o início da extrusão. Ao fim do processo de impressão o material estava mais rígido, muito provavelmente pela ação do acelerador de presa.

A mistura denominada D2 mostrou uma boa extrudabilidade, assim como as demais argamassas com as proporções 50/50%. Sobretudo a consistência desta argamassa não dava solidez para a camada seguinte, que se unia a primeira camada. Assim o desfasamento não resultou. Para atingir melhores resultados pode-se diminuir a relação água/cimento, diminuindo o espalhamento na mesa, ou adicionar o acelerador de presa, que nesta mistura estava ausente em relação a mistura D1.

Assim, na mistura denominada D3 a boa extrudabilidade foi nítida, mas não resistiu ao desfasamento. Mesmo com uma relação água/cimento maior, que resulta num maior espalhamento na mesa também maior, apresentou um aspeto mais sólido que a mistura D2.

A mistura denominada D4 voltou a apresentar uma boa trabalhabilidade. Esta mistura, baseada na mistura D1, apresentou melhor extrudabilidade ao se reduzir as frequências (Hz) e a pressão (bar), permitindo uma defasagem até à oitava camada de extrusão, na qual obteve um colapso no setor com desfasamento maior.

Na mistura denominada D5, optou-se por elevar a relação água/cimento para 40% o que resultou numa maior fluidez da mistura. Numa pressão de 2 Bar, a mistura era extrudada facilmente, o que aumentava o espalhamento na mesa de impressão, e não permitiu uma sobreposição de camadas adequada, devido ao fato de a camada inferior não estar rígida o suficiente para receber a subsequente.

Na mistura denominada D6 optou-se por voltar a trabalhar com 36% da relação água/cimento, alterando a pressão da máquina de extrusão. Com esta mistura conseguiu-se uma sobreposição até a nona camada.

Na mistura denominada D7, o aumento de adjuvante superplastificante resultou em uma amostra muito fluida após o início da extrusão, ao contrário do que foi observado na mesa de espalhamento.

Os resultados dos ensaios de impressão D8 à D14 são apresentados na Figura 4.3.



Figura 4.3 – Resultados de impressão da estrutura com paredes inclinadas (2)

Na mistura denominada D8 foi alterada a relação de ligantes da mistura, ou seja, diminuiu-se a percentagem de cinzas volantes. Ao critério de desfasamento a mistura se comportou bem, mas apresentou certa fissuração ao se depositar sobre camadas, que não era apresentada quando havia maior percentagem de cinzas.

Isso levou a mistura denominada D9, que aumentou a relação de cinzas nos aglomerantes. A impressão se mostrou mais limpa e fácil, com boa aparência visual e boa sobreposição de camadas.

O aumento da quantidade de cinzas confere uma argamassa com melhor extrusão, melhorando seu estado fresco, aumentando a coesão, a viscosidade e a plasticidade, reduzindo a exsudação e a segregação, conforme relatado por (Dal Molin, 2011). Sendo assim, pode-se perceber o papel importante das cinzas volantes no que diz respeito extrusão e homogeneidade da mistura, levando a questionar-se até que ponto é viável o aumento de cinzas volantes no processo de mistura.

Na mistura denominada D10 observou-se que o acréscimo de cinzas não melhorou a estrutura de extrusão. A mistura teve sua extrusão melhorada, mas não aguentou mais que 5 camadas de desfasamento.

Já a mistura denominada D11, com 40% de cinzas, teve sua capacidade estrutural melhorada se comparada com a mistura D10, mas não resultou tão bem quanto a mistura D9. Portanto, a melhor composição foi a mistura D9.

Partindo do ponto da mistura denominada D9, ainda se fez necessário a inclusão de fibras para entender sua importância num aspecto estrutural na impressão 3D. Com seu papel de reduzir as fissurações que os elementos argamassados possam vir a sofrer em seu processo de cura, a utilização de fibras tem um papel importante na impressão 3D. Assim, para a mistura denominada D12 foi acrescentado 0,6% de fibras sobre o peso do cimento. O processo de extrusão se tornou complicado, pois o bocal de impressão não tinha diâmetro suficiente para trabalhar com a relação água/cimento já estipulada. Após repetir o processo, a impressão teve seu *layer* diminuído, seu aspecto visual deixou a desejar, sendo uma impressão não homogênea, áspera, e semelhante a uma espinha de peixe. No entanto, apresentou boa capacidade estrutural.

Nesse sentido, a mistura denominada D13 buscou diminuir a quantidade de fibras, e o aumento da relação água/cimento. Uma pequena melhora na aparência visual pode ser observada, mas a dificuldade de impressão ainda é perceptível, junto com uma diminuição na capacidade estrutural na impressão.

Na mistura denominada D14 houve uma diminuição na quantidade de fibras ainda maior, sendo os problemas de impressão ainda perceptíveis a olho, num aspecto visual que ainda deixa a desejar, sendo o uso de fibras, embora importante, neste sistema de impressão, não aconselhável.

A adaptação do robô foi fixada com uma pressão no embolo de 3 bar, com uma frequência do motor de 30 Hz e uma velocidade de impressão de 40 mm/s, para um espalhamento de  $17 \text{ cm} \pm 0.5 \text{ cm}$ . A melhor relação de aglomerante foi a de 70% de cimento com 30% de cinzas volantes, o acelerador de presa em 0,5% e o superplastificante em 1%. O uso de fibras, embora importante não se torna aplicável ao modelo de extrusão usado para este ensaio.

## **4.2. Consistência por espalhamento e tempo em aberto**

Com o aumento da relação água/cimento, observou-se um maior espalhamento na mesa de consistência, que teve pouca variação no restante da constituição da argamassa. A relação água/cimento com melhor efetividade é a de 36%. Quanto ao tempo em aberto, foi observado

que a utilização de fibras apresentou uma diminuição de 15 minutos no tempo em aberto da mistura.

### 4.3. Resistência mecânica

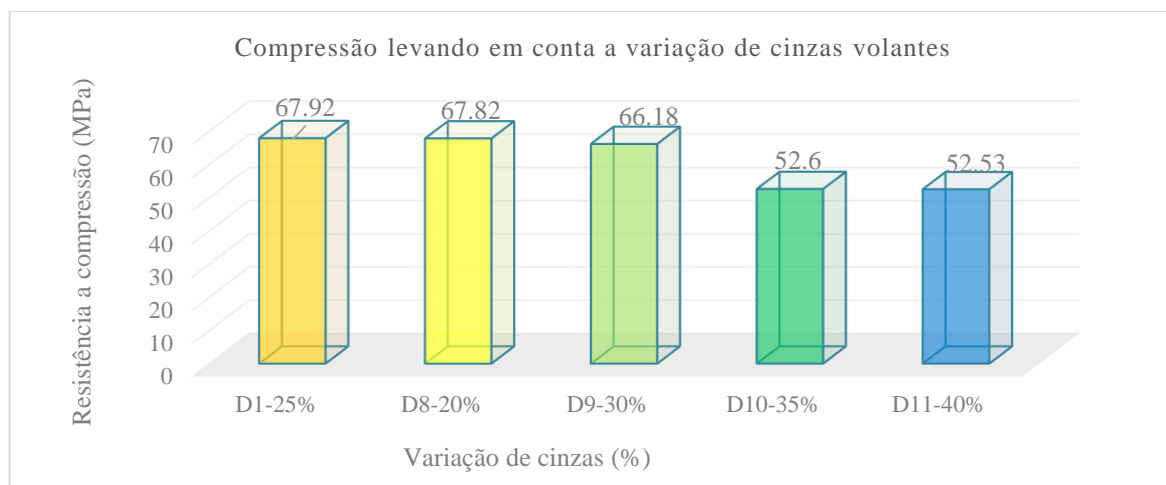
Os resultados dos ensaios realizados de resistência mecânica em 6 misturas, são apresentados no Quadro 4.1.

Quadro 4.1 – Resultados da resistência mecânica

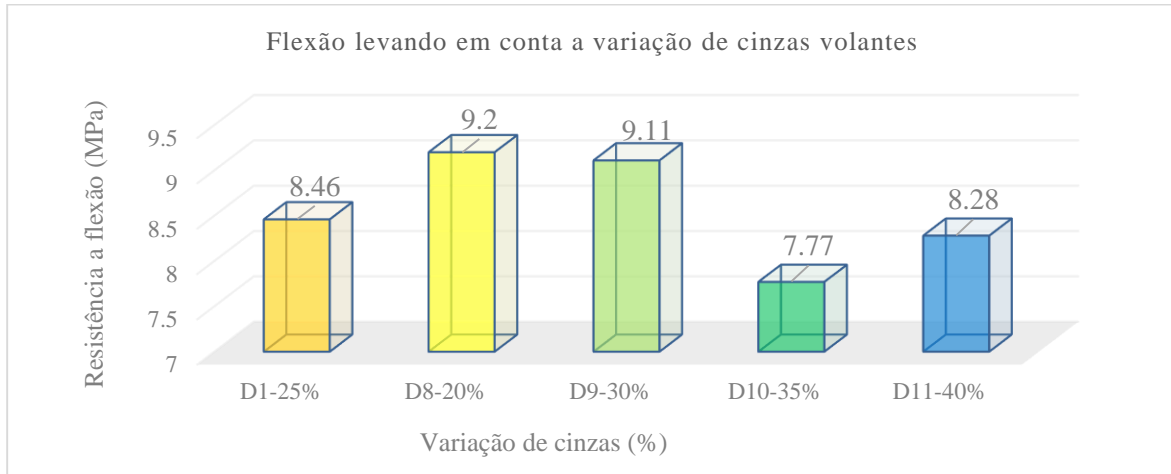
Mistura	Resistência a flexão (MPa)	Resistência à compressão (MPa)
<b>D1</b>	8,46	67,92
<b>D8</b>	9,2	67,82
<b>D9</b>	9,11	66,18
<b>D10</b>	7,77	52,6
<b>D11</b>	8,28	52,53
<b>D12</b>	8,54	55,22

A variação de cinzas volantes na mistura apresentou pouca variação na resistência até o valor de 30% do valor total do aglomerante. Já quando se colocou uma quantidade superior a 30%, houve uma redução de quase 23% na resistência à compressão e 15,5% na resistência a flexão, conforme pode-se observar no Gráfico 4.1 e no Gráfico 4.2.

Gráfico 4.1 – Compressão com variação de cinzas volantes

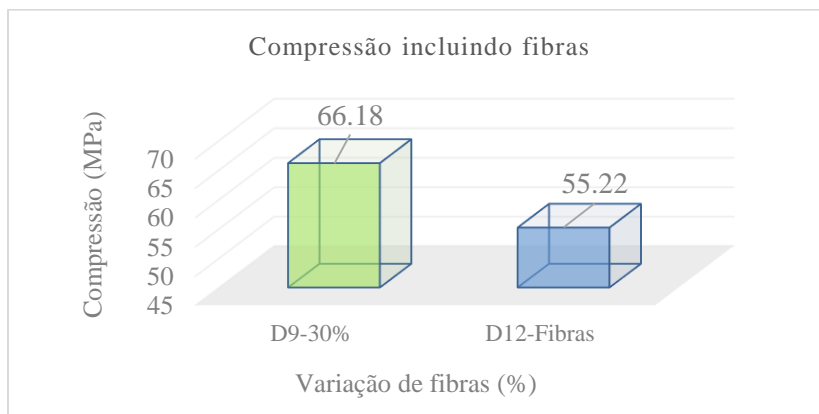


**Gráfico 4.2 – Flexão com variação de cinza volantes**

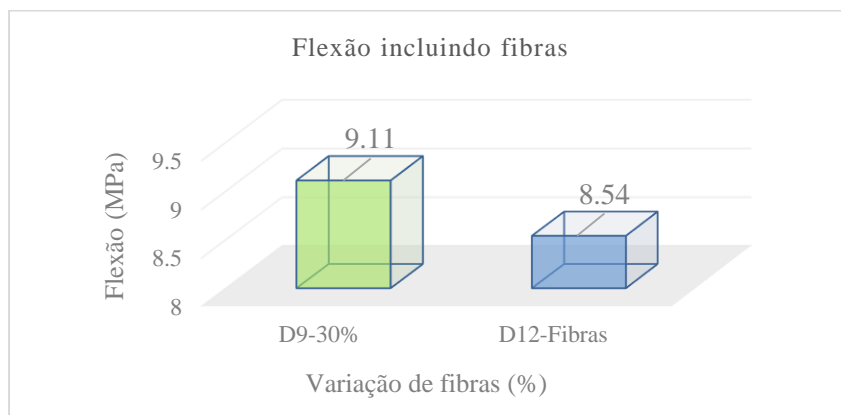


Já a adição de fibras, não impactaram na melhora da resistência mecânica da mistura D12, tendo uma diminuição de 16,5 % na compressão, e de 6,25% na flexão (Gráfico 4.3 e Gráfico 4.4), se comparada com a mistura D9, que apresenta os melhores resultados de extrusão.

**Gráfico 4.3 – Compressão com variação de fibras**



**Gráfico 4.4 – Flexão com variação de fibras**



#### 4.4. Impressão de um banco

Conforme pode-se observar, a mistura denominada D9 apresentou os melhores resultados, se comparados com todas as observações e análises realizadas. Partindo deste princípio de mistura, após melhorias no sistema de impressão, a extrusão de um banco, para duas pessoas foi idealizada. O processo de mistura levou 60 kg de mistura por vez, que era lançado para a bomba da qual levava o material até a cabeça de impressão. Por ser um equipamento novo, o processo teve de ser ajustado.

Todo o equipamento foi humedecido para receber a mistura. No primeiro processo de impressão (Figura 4.4), uma calda foi utilizada para lubrificar a bomba e a mangueira, no entanto, por reter muita água no equipamento, houve um excesso de fluidez na mistura e isto fez com que a primeira camada fosse impressa com material mais fluido e, pelo aumento da relação água/cimento, a mistura se tornou menos resistente.

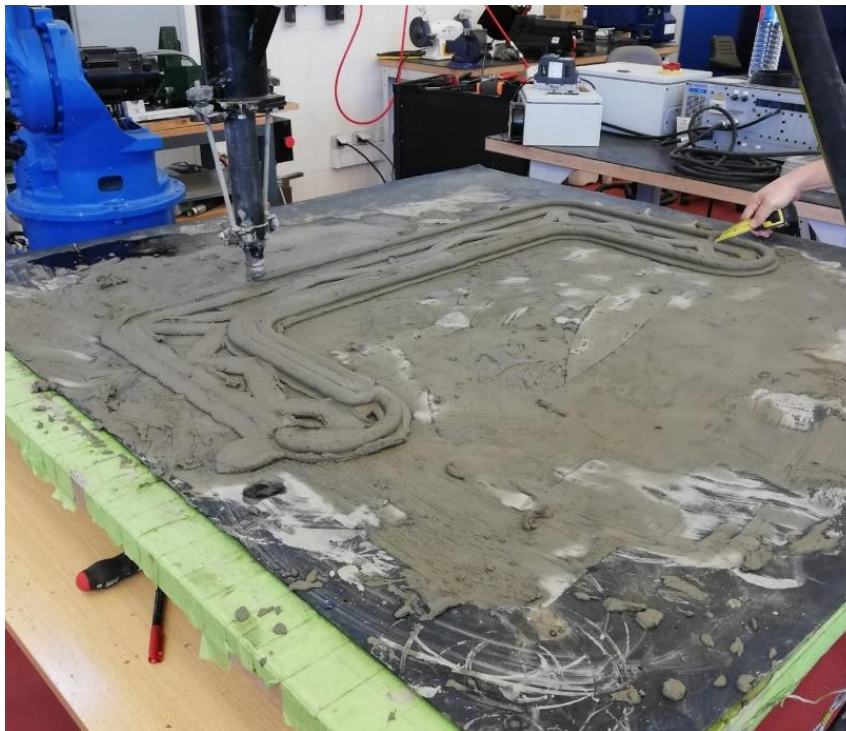


Figura 4.4 – Primeiro processo de impressão

A sobreposição de camadas, por consequência, forçou as camadas inferiores, que por ora mais fluidas, não apresentaram uma estrutura robusta o suficiente para suportar as cargas, levando a um colapso da estrutura na 15ª camada (Figura 4.5).

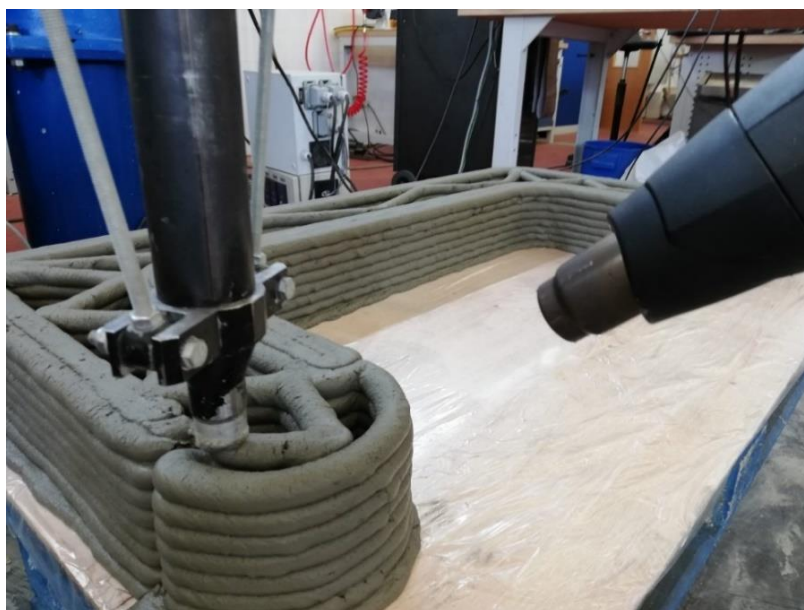


**Figura 4.5 – Colapso da estrutura na 15ª camada**

Outro fator levado em consideração para o colapso foi que a união de travamento não se deu na curva do banco, conforme apresentado na Figura 4.5.

Por este motivo foi realizada uma alteração nos pontos de impressão e alterado o processo de humedecimento do equipamento, não deixando que a quantidade de água alterasse fortemente os parâmetros da mistura.

Para auxiliar na aceleração do tempo de presa, foram utilizadas pistolas de ar quente num processo manual seguindo cada filamento a ser extrudido, conforme apresentado na Figura 4.6.



**Figura 4.6 – Pistolas de ar quente para aceleração do tempo de presa**

Na Figura 4.6 ainda podemos observar que as linhas de travamento da mistura estão totalmente ligadas as linhas exteriores, formando uma peça única e rígida. Ao fim do processo de impressão, o resultado ficou conforme na Figura 4.7.



Figura 4.7 – Resultado da impressão

Na Figura 4.7 pode-se observar, além do banco, a imagem original do modelo do projeto, apresentando um projeto concluído e satisfatório do conjunto.

#### 4.5. Extração e ensaios mecânicos de elementos impressos

Ao se retirar os provetes e estes serem ensaiados nos mesmos moldes dos ensaios mecânicos já descritos, pode-se observar os resultados através do Quadro 4.2.

Quadro 4.2 – Resultados dos ensaios de flexão e compressão do elemento impresso

Setor de corte	Resistência a flexão	Resistência a compressão
	(MPa)	(MPa)
1	9,06	44,99
2	7,44	47,99
3	4,74	42,69
4	6,32	30,01
5	11,73	38,16
6	6,95	40,92
7	6,71	42,45
8	5,73	46,32

Ao ser extrudido, *layer* pós *layer*, tanto lado a lado, como em camadas sobrepostas, o filamento acabou apresentando vazios de ar (Figura 4.8).

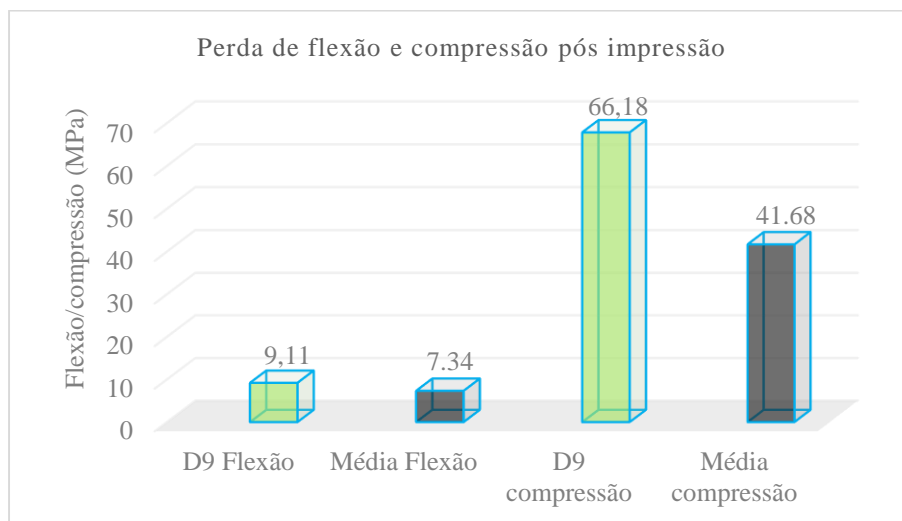


**Figura 4.8 – Filamentos com vazios**

Além dos vazios, outro fator importante foi o processo de cura e a compactação do provete por mesa vibratória. Sendo assim, analisou-se em dois segmentos, horizontal e vertical de extração, levando em consideração a Figura 3.15, além da média geral das oito amostras comparadas aos ensaios em laboratório da composição denominada D9.

Em uma média final de impressão, na flexão foi apresentada uma perda de aproximadamente 20% e na compressão uma perda de 38,5%, conforme apresentado no Gráfico 4.5.

**Gráfico 4.5 – Média de perda na flexão e compressão depois da impressão**



## 4.6. Ensaio de tração entre filamentos

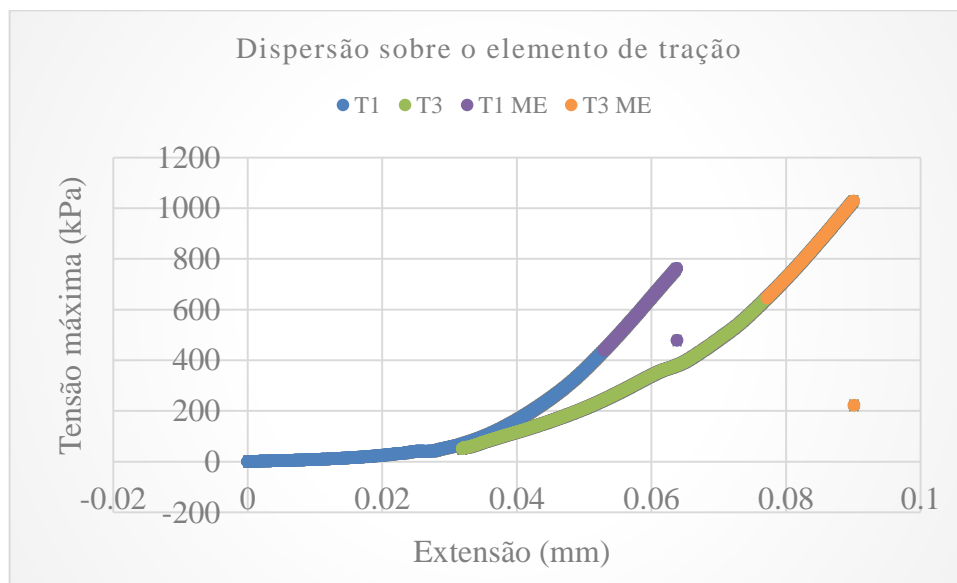
### Ensaio de tração perpendicularmente à junta

Era de se esperar, como aconteceu, a rutura da carga pela união dos filamentos, não só pela falta de compactação da mistura, que acontece dentro do filamento, mas também pela diminuição da área de contato entre filamentos.

No provete T1, a área total é de aproximadamente 36 cm<sup>2</sup>, tendo a área de contato entre os filamentos de 28 cm<sup>2</sup>, e sendo esta a área que suporta a força de tração. A força necessária para romper a amostra foi de 2118 N. Na amostra T3, a força de rutura foi de 2213 N e sua área total de atuação é de 21,52 cm<sup>2</sup>.

Sendo assim, as dispersões sobre o elemento de tração dos provetes são apresentadas no Gráfico 4.6. Os dados do ensaio de tração perpendicular à junta são apresentados no Quadro 4.3.

Gráfico 4.6 – Dispersão sobre o elemento de tração



(ME) reta a partir do qual se retira o módulo de elasticidade

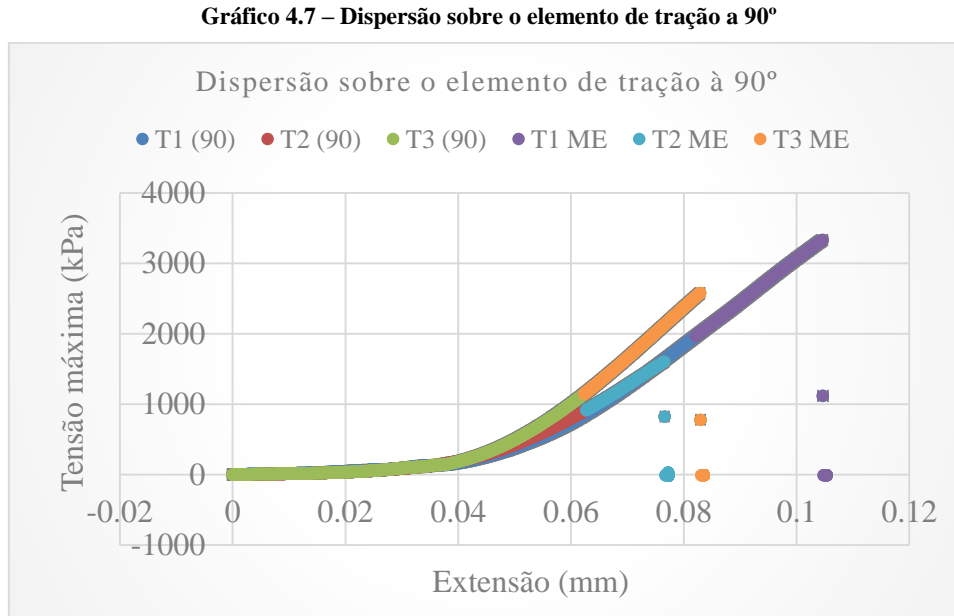
Quadro 4.3 – Dados do ensaio de tração perpendicularmente à junta

	<b>T1</b>	<b>T3</b>
<b>Área (cm<sup>2</sup>)</b>	36	21,52
<b>Força para romper o provete (N)</b>	2118	2213
<b>Tensão máxima (kPa)</b>	761,89	1027,88
<b>Módulo de elasticidade (kPa)</b>	29932,36	29658,83

Havia um provete T2, no qual teve rutura pela cola, sendo assim, desconsiderado para fins de estudo.

### Ensaio de tração paralelos à junta

Os resultados da análise da rutura a 90° pode ser analisada no Gráfico 4.7, e os dados do ensaio de tração paralelo à junta no Quadro 4.4.



(ME) reta a partir do qual se retira o módulo de elasticidade

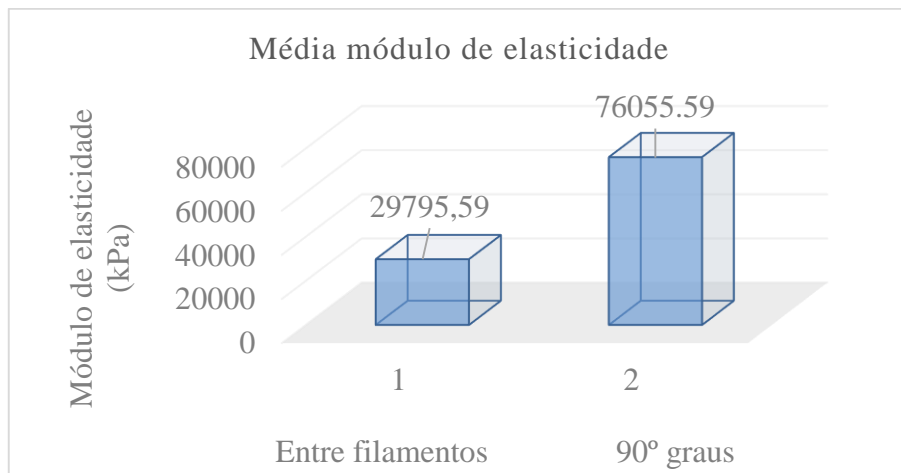
**Quadro 4.4 – Dados do ensaio de tração paralelo a junta**

	<b>T1</b>	<b>T2</b>	<b>T3</b>
<b>Área (cm<sup>2</sup>)</b>	9,32	11,82	9,44
<b>Força para romper o provete (N)</b>	1839	1877	2435
<b>Tensão máxima (kPa)</b>	3334,76	1603,21	2578,39
<b>Módulo de elasticidade (kPa)</b>	60925,47	49665,28	109350,5

O comportamento apresentado no Gráfico 4.7 é muito semelhante em todos os provetes. A rutura a 90° do provete T1 (90) apresenta uma área de contato de 9,32 cm<sup>2</sup>, sendo a força máxima para a rutura do provete de 1839 N, o provete T2 (90), tendo uma área de 11,82 cm<sup>2</sup> e necessitou de 1877 N para ser rompido, e o provete T3 (90) necessitou de 2435 N para romper tendo uma área de 9,44 cm<sup>2</sup>.

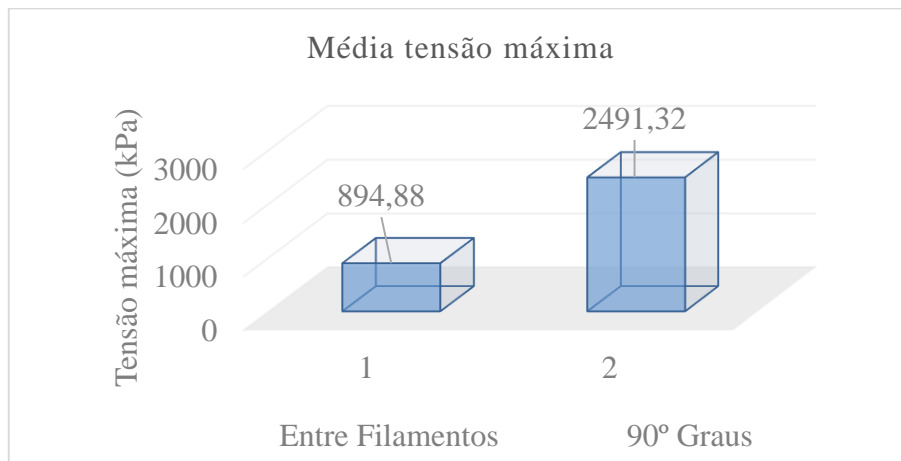
Através do Gráfico 4.8, tem-se a média dos provetes face ao módulo de elasticidade.

**Gráfico 4.8 – Média do módulo de elasticidade dos provetes**



Já a média da tensão máxima pode ser observado através do Gráfico 4.9.

**Gráfico 4.9 – Média da tensão máxima dos provetes**



Nota-se uma força de resistência maior a tração nos ensaios realizados paralelamente à junta, tendo um acréscimo na tensão máxima de 64% e no módulo de elasticidade de 61%.

A resistência de união entre as camadas de betão impresso, pode ser a propriedade mecânica mais preocupante para um processo de impressão, devido ao fato da impressão poder criar falhas na extrusão, que induzem concentrações de tensões. Este fator depende da adesão das camadas, que é uma função do tempo em aberto da mistura (Le *et al.*, 2012). Isto justifica a diminuição da resistência à tração perpendicularmente às juntas de impressão.

#### **4.7. Ensaio de compressão da argamassa fresca**

O total de imagens retiradas foi de 165, formando um vídeo de 2 minutos e 45 segundos. Ao se analisar o vídeo notou-se o momento de rutura aos 87 segundos (Figura 4.9).

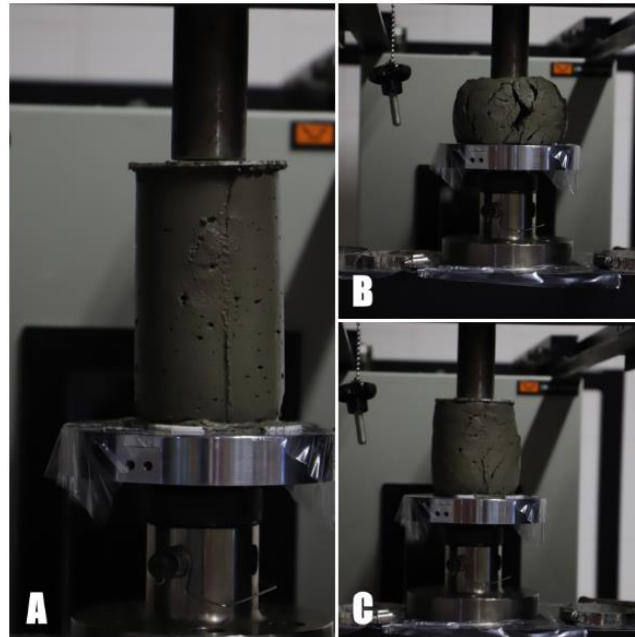
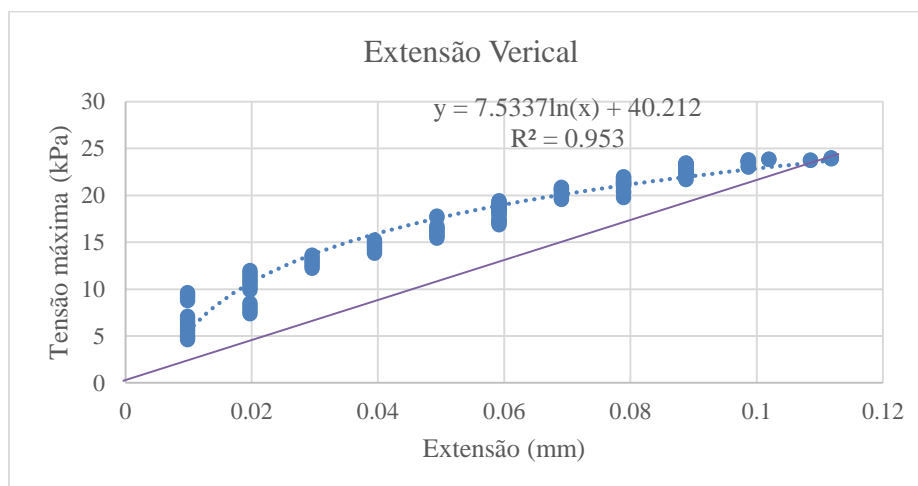


Figura 4.9 – Ruptura aos 87 segundos

Ao se retirar os pontos de deslocamento pelo *Software Kinovea*, cada segundo se torna 30 frames, e ao ser exportado para o *Software Excel*, uma tabela de cerca de 5000 pontos de deslocamentos foi criada. Buscou-se dentro de cada frame o deslocamento, e através disto, obter a extensão de cada ponto na vertical.

O módulo de elasticidade foi retirado considerando o ponto de rotura através da reta que intercepta a curva tensão *versus* extensão, conforme Gráfico 4.10.

Gráfico 4.10 – Módulo de elasticidade



Sendo assim, o valor do módulo de elasticidade foi de 214 KPa, sendo a tensão máxima de suporte 23,58 KPa. Wolfs *et al.* (2018) realizou ensaios deste tipo, tendo encontrado um módulo de elasticidade de 78 KPa. A composição da argamassa e os critérios de ensaios

poderão ter sido os responsáveis por esta diferença. A realização de ensaios adicionais será necessária para justificar convenientemente as diferenças obtidas.

#### 4.8. Ensaio de corte com argamassa na idade inicial

O resultado de cada leitura foi tabelado conforme tabela no Anexo G. Para cada ensaio foi realizado um gráfico de tensão de corte *versus* deformação. Os gráficos para os ensaios sem peso são apresentados na Figura 4.10. A tensão de corte em kPa é no eixo “y” e a deformação em mm no eixo “x”.

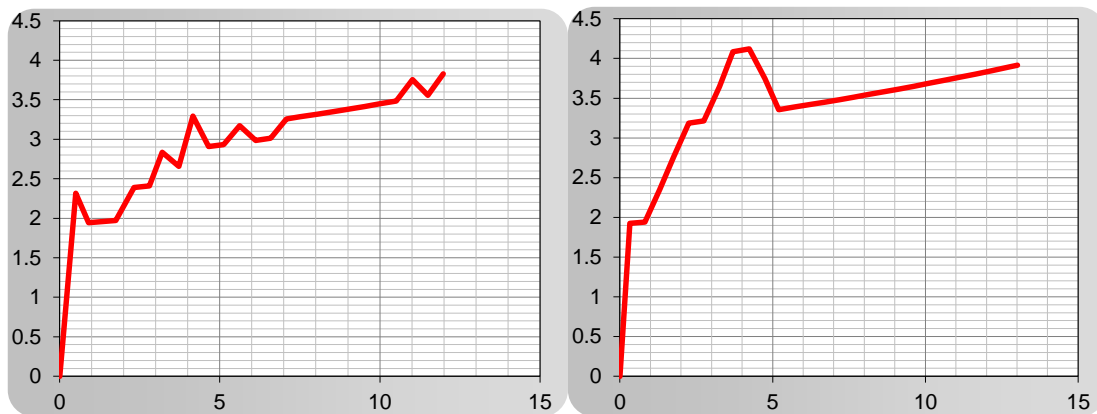


Figura 4.10 – Tensão de corte e deformação horizontal sem peso

Já os gráficos para do ensaio de corte com peso são apresentados na Figura 4.11.

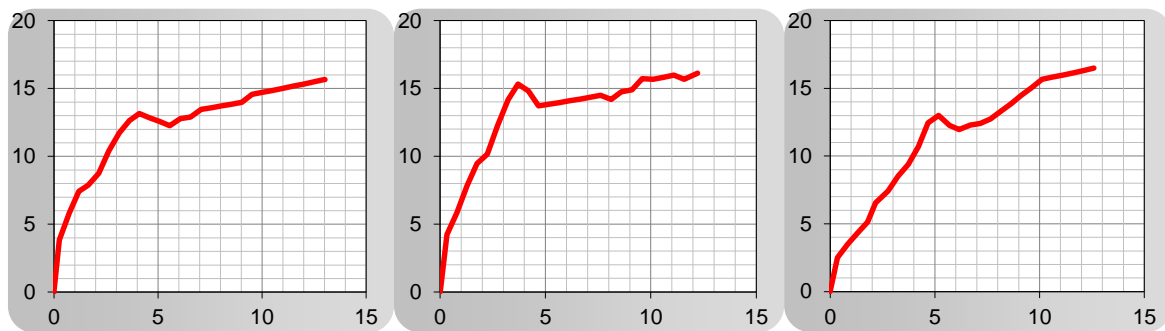


Figura 4.11 – Tensão de corte e deformação horizontal com peso

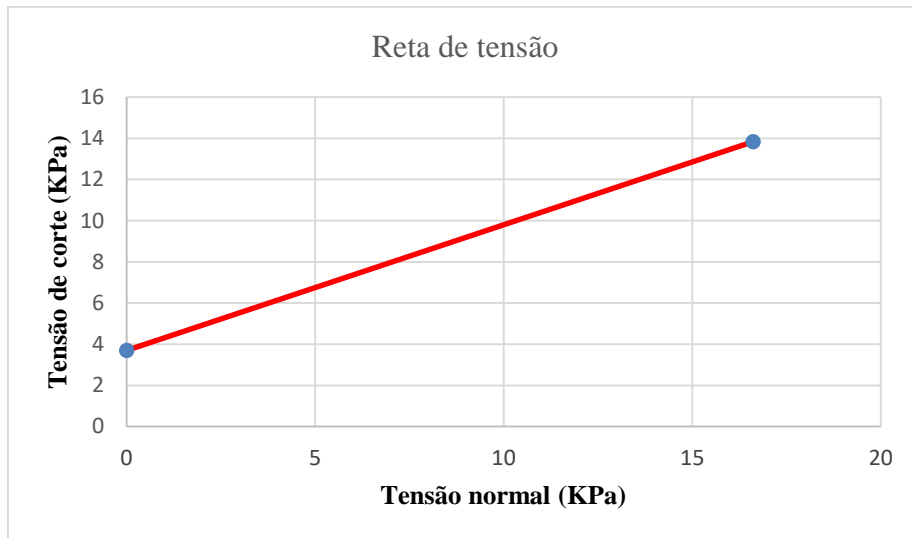
Os resultados de corte obtidos para cada gráfico são apresentados no Quadro 4.5.

Quadro 4.5 – Resultados do ensaio de corte

Ensaio	sem peso	com peso
Tensão Normal (kPa)	0	16,61
Tensão de Corte (kPa)	3,3	13
	4,1	15,3
	-	13,2
Média Tensão de Corte (kPa)	3,7	13,83

Nota-se que o aumento de carga, assim como no estudo de Wolfs *et al.* (2018), apresentou uma crescente na tensão ao corte, conforme seria de esperar (Gráfico 4.11).

Gráfico 4.11 – Reta da tensão de corte



#### 4.9. Modelação dos elementos impressos com os resultados dos ensaios do módulo de elasticidade e corte

A modelação realizada no *Software Robot Analysis Structural*, levou em consideração os parâmetros apresentados a secção 3.3.9.

O resultado para a tensão máxima de compressão foi de 2,38 kPa (Figura 4.12 – A), que é inferior à resistência prevista para o betão fresco obtida nos ensaios que é uma tensão máxima de suporte 23,58 kPa. A análise visual da amostra após a impressão não mostrou compressão das camadas de suporte, sendo assim, as tensões de compressão não parecem ser a causa da falha de algumas amostras impressas.

A análise de tração (Figura 4.12 – B) apresenta uma tração máxima de 0,27 kPa, sendo que a pasta fresca não resiste a esforços de tração, esta parece ser a causa da rutura. Por outro lado, as tensões de corte apareceram na borda superior dos corpos de prova com valor máximo de 0,23 kPa, também inferior ao resultado obtido que é de 3,7 kPa.

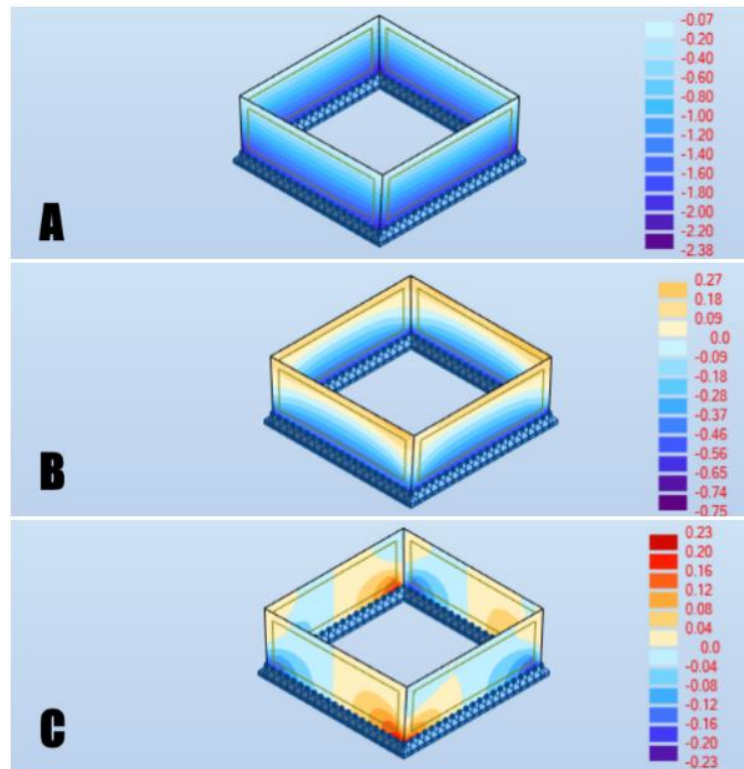


Figura 4.12 – Tensão máxima de compressão do modelo no *Software Robot* A) Tensões de compressão; B) Tensões de tração C) Tensões de corte em kPa

Já na modelação do banco, as tensões aplicadas não refletiram nenhuma falha estrutural para o colapso da estrutura, conforme pode-se observar na Figura 4.13.

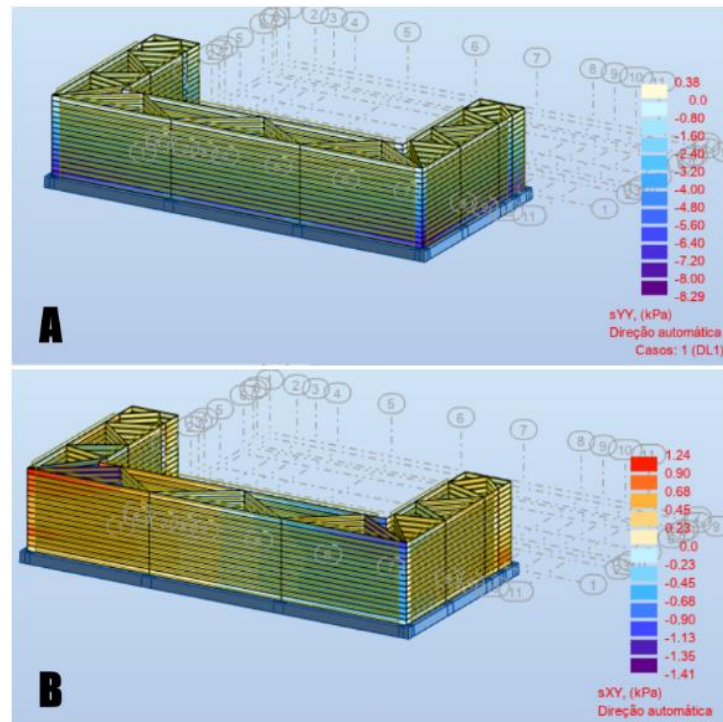


Figura 4.13 – Tensões do modelo estrutural no *Software Robot*: A) Tensões de compressão; B) Tensões de corte em kPa

A Figura 4.13 apresenta uma compressão máxima de 8,29 kPa, aproximadamente 65% menos aos 23,58 kPa resultantes no ensaio de compressão. A modelação quando solicitada ao corte apresenta 1,24 kPa no bordo superior ao banco, bordo esse que pelos ensaios de tração devem resistir até 3,7 kPa. Assim, o colapso da estrutura pode ser atribuído ao facto de os elementos de travamento não estarem ajustados ao bordo do banco, sendo o local de transição (encosto das costas do banco para o encosto do braço), o local mais solicitado da estrutura conforme Figura 4.5. Outro fator que pode ter correspondência ao colapso é a maior relação água/cimento, causada pelo modo de umidificação dos elementos constituintes do equipamento de impressão de grande porte. A relação água/cimento está diretamente ligado a resistência de um elemento argamassado. Mais ensaios devem ser realizados para compreender melhor a estrutura.

## 5. Conclusões

### 5.1. Processo de impressão e misturas

O processo de impressão apresentou melhores resultados com a adaptação para elevar a proporção de extrusão da mistura, sendo a mistura D9, com proporção cimento agregado de 50/50%.

A granulometria da mistura que apresentou o melhor resultado foi de rocha calcária menor que 1 mm.

Quanto a proporção de cinza volante, o melhor resultado extrusão/ensaios mecânicos, foi na proporção de 30% do peso do cimento.

A quantidade de superplastificante da mistura deve ser de 1%, sendo que a quantidade superior a esta, aumentou o espalhamento do filamento na extrusão, aumentando assim seu tempo de vida.

Já quanto ao acelerador de presa, para o estudo em questão a proporção de 0,5% do peso de cimento foi suficiente.

A relação água/cimento com melhor resultado na mistura foi de 0,36%, proporcionando um espalhamento na mesa de  $17 \text{ cm} \pm 0,5 \text{ cm}$ , evidenciado pelos testes o melhor espalhamento para a extrusão da mistura.

Quanto ao uso de fibras, para este estudo não apresentou bons resultados, embora mais testes devem ser realizados, pois a área superficial de argamassa é muito grande, podendo assim causar fissurações.

Ao definir a mistura, e com a melhoria do processo de impressão, um banco com cerca de 490 kg de uma mistura argamassada foi realizado.

Em relação a capacidade mecânica da mistura, apresentou uma diminuição de aproximadamente 20% na flexão e na compressão uma perda de 38,5%, para os elementos já impressos.

Quanto a tração, é apresentada uma média de tensão máxima de 894,88 kPa quando é tracionada entre os filamentos, e uma média de tensão máxima de 2491,32 kPa perpendicular

aos filamentos. Mais ensaios devem ser executados para melhorar a performance entre filamentos, aumentando a área de contacto ou proporcionando mais atrito, podendo ser estudado a utilização de fibras neste processo.

Já no estudo da composição fresca da mistura, pode-se perceber o módulo de elasticidade e a tensão ao corte da mistura na idade em que o processo de impressão é executado, podendo ser realizadas modelações em *Softwares* estruturais para a execução da extrusão. Neste segmento mais ensaios devem ser realizados, para afinar os coeficientes estudados, e analisar a evolução dos coeficientes conforme a idade do elemento argamassado progride, podendo estudar o processo de impressão inteiro no *Software*.

Referente a modelação no *Software Robot*, a mesma apresentou bons resultados face aos resultados laboratoriais, induzindo o colapso na primeira tentativa de impressão do banco a má união dos travamentos da estrutura e a falta de sustentação das primeiras camadas extrudidas que apresentavam uma relação água/cimento com um teor mais elevado.

## **5.2. Sugestão para trabalhos futuros**

Baseado nos estudos apresentados neste trabalho, percebe-se que parâmetros devem ser melhorados e outros ser estudados para que assim, o desenvolvimento do projeto tenha um êxito de execução, tais como:

- Melhoria da composição da mistura, diferentes aditivos, aprofundando o estudo com fibras e a utilização de um cimento de alta resistência.
- Refinar o estudo de resistência nas idades iniciais da mistura, não só para o tempo 0 de extrusão, mas para cada 15 minutos, que constituem o tempo de estudo de vida do elemento argamassado.
- Estudar a resistência dos elementos nas idades iniciais com a utilização da pistola de ar quente.
- Estudar a resistência mecânica do material impresso após endurecimento e compará-la com outras tecnologias de construção
- Analisar o isolamento acústico e térmico que uma estrutura modular, nestes moldes, proporciona.
- Estimativa de tempo/custo em relação aos processos tradicionais.

## Referências Bibliográficas

- AROSO, Manuel Eduardo. (1991) - Durabilidade dos betões. Universidade do Porto, 1991. Tese de mestrado.
- ASTM 52900 (2015) - *Standard Terminology for Additive Manufacturing – General Principles – Terminology*. ASTM International, West Conshohocken, PA., p. 1–11. Disponível em: [www.astm.org](http://www.astm.org).
- ASTM International F2792-12a (2013) - *Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies*, in *Rapid Manufacturing Association*, p. 10–12. doi: 10.1520/F2792-12A.2.
- BAUER, L. A. Falcão (2011) - *Materiais de construção*. Vol. 1, 5ª Ed. Rio de Janeiro: LTC (Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda), 2011. 488p. ISBN 978-85-216-1249-0.
- BERMAN, Barry. (2012) - *3-D printing: The new industrial revolution*. *Business Horizons*. *Kelley School of Business, Indiana University*. 55(2), p. 155–162. doi: 10.1016/j.bushor.2011.11.003.
- BOLANDER, John E., CHOI, Sokhhwan, DUDDUKURI, Sri R. (2008) - *Fracture of fiber-reinforced cement composites: Effects of fiber dispersion*. *International Journal of Fracture*, ISSN 03769429. Vol. 154 (2008), p. 73-86. doi: 10.1007/s10704-008-9269-4.
- BOS, Freek. WOLFS, Rob. AHMED, Zeeshan., SALET. Theo (2016) - *Additive manufacturing of concrete in construction: potentials and challenges of 3D concrete printing*. *Virtual and Physical Prototyping*. ISSN 17452767. Vol. 11, nº 3 (2016), p. 209-225. doi: 10.1080/17452759.2016.1209867.
- BUREM, A. (2015) ‘*Lewis Grand Hotel teams with Andrey Rudenko to develop world’s first 3D printed hotel, planning 3D printed homes*’, *3ders.org*. Disponível em: <http://www.3ders.org/articles/20150909-lewis-grand-hotel-andrey-rudenko-to-developworlds-first-3d-printed-hotel.html>. (Acesso em: 15 de janeiro em 2020).
- BUREM, A. (2016) ‘*Exquisite 400 m2 villa 3D printed on-site in Beijing in just 45 days*.’, *3ders.org*. Disponível em: <http://www.3ders.org/articles/20160614-exquisite-400-m2-villa-3d-printed-on-site-in-beijing-in-just-45-days.html>. (Acesso em: 15 de janeiro em 2020).
- CASAREK, Helena – *Materiais de construção civil e princípios de ciência dos materiais*. Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON), 2007, p. 863-904.
- CHUA, C. K., CHOU, S. M. and WONG, T. S – *A study of the state-of-the-art rapid prototyping technologies*. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. ISSN 02683768. Vol. 14, nº 2 (1998), p. 146-152. doi: 10.1007/BF01322222.
- DAL MOLIN, D. C. C. (2011) ‘*Adições Minerais*’, Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON), 2011.
- DONALDSON, T. H. and DONALDSON, T. H. (2016) ‘*Managing the Internal Process*’, *Credit Control in Boom and Recession*, pp. 161–173. doi: 10.1057/9780230390249\_12.

DUBAJ, Eduardo – Estudo comparativo entre traços de argamassa de revestimento utilizadas em Porto Alegre. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2000. Tese de mestrado. 115p.

EN 1015-3 (1999) - Methods of test for mortar for masonry Part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table).

FERNANDES, V. and SILVA, L. (2017) ‘Influência de aceleradores de presa nas propriedades de um reboco monocamada’.

FERREIRA, K. C., GONÇALVES, S. G., CARDOSO, D. M. P., SOUZA, J. A. S., FELIPE, A. M. P. F. (2014) ‘Avaliação de parâmetros físicos e químicos para a incorporação de argamassas utilizando cniza volante e resíduo da construção civil’, XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química, 2014.

FIORITO, Antonio J. S.I – Manual de Argamassas e Revestimentos: Estudos e Procedimentos de Execução. 2ª Ed. São Paulo: Editora Pini, 2009. 232p. ISBN 978-85-7266-189-9.

GALANTUCCI, L. M., LAVECCHIA, F., PEROCO, G. – *Quantitative analysis of a chemical treatment to reduce roughness of parts fabricated using fused deposition modeling*. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. ISSN 00078506. Vol. 54 (2010), p. 247-250. doi: 10.1016/j.cirp.2010.03.074.

GAO, W., ZHANG, Y., RAMANUJAN, D., RAMANI, K., CHEN, Y., WILLIAMS C., WANG, C. C. L., SHIN, Y. C., ZHANG S., ZAVATTIERI, P. D. (2015) - *The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering*. *CAD Computer Aided Design*. ISSN 00104485. Vol. 69 (2015), p. 65-89. doi: 10.1016/j.cad.2015.04.001.

GCR (2013) – *Instant isolation rooms: Chinese firm prints quarantine pods for hospitals struggling with virus*. Disponível em: <http://www.globalconstructionreview.com/news/instant-isolation-rooms-chinese-firm-prints-quaran/> (Acesso: 26 de Maio de 2020).

GEISSBAUER, R., SCHRAUF, S., KOCH, V., KUGE, S. (2014) ‘Industry 4.0: Opportunities and Challenges of the Industrial Internet’, *PricewaterhouseCoopers Aktiengesellschaft Wirtschaftsprüfungsgesellschaft*. ISSN 00150282. Vol. 2 (2014). 52p. doi: 10.1016/j.futures.2014.12.002.

GIBSON, I., ROSEN, D. and STUCKER, B. (2015a) ‘*Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing, second edition*’, *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing, Second Edition*, pp. 1–498. doi: 10.1007/978-1-4939-2113-3.

GIBSON, I., ROSEN, D. and STUCKER, B. (2015b) *Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing, second edition*, *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing, Second Edition*. doi: 10.1007/978-1-4939-2113-3.

GIBSON, I., ROSEN, D. W. and STUCKER, B. (2010) ‘*Additive manufacturing technologies: Rapid prototyping to direct digital manufacturing*’, in *Additive Manufacturing*

*Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing*, pp. 1–459. doi: 10.1007/978-1-4419-1120-9.

GONÇALVES, Bruno. J. S. (2011) - Formulações de argamassas controladoras de humidade ambiente. Aveiro: Universidade de Aveiro, 2011. Tese de mestrado. 99p.

HAGER, Isabela, GOLONKA, Anna and PUTANOWICZ, Roman. (2016) ‘3D Printing of Buildings and Building Components as the Future of Sustainable Construction?’, *Procedia Engineering*. ISSN 18777058. Vol 151 (2016), p. 292–299. doi: 10.1016/j.proeng.2016.07.357.

HAMBACH, Manuel and VOLKMER, Dirk. (2017) ‘Properties of 3D-printed fiber-reinforced Portland cement paste’, *Cement and Concrete Composites*. Elsevier Ltd. ISSN 09589465. Vol. 79 (2017), p. 62–70. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2017.02.001.

HARTY, Chris. (2008) ‘Implementing innovation in construction: Contexts, relative boundedness and actor-network theory’, *Construction Management and Economics*. ISSN 01446193. Vol 26 n° 10, p. 1029–1041. doi: 10.1080/01446190802298413.

HULL, Charles W. (2015) ‘The birth of 3D printing’, *Research Technology Management*. ISSN 19300166. Vol. 58 n° 6 (2015), p. 25–29. doi: 10.5437/08956308X5806067.

JI, G., DING, T., XIAO, J., DU, S., LI, J., DAUN, Z. (2019) ‘A 3D Printed Ready-Mixed Concrete Power Distribution Substation: Materials and Construction Technology’, *Materials*. Vol. 12 n° 9 (2019), p. 1540. doi: 10.3390/ma12091540.

JIANCHAO, Z., ZHANG, T., FARIED, M., WENGANG, C. (2017) ‘3D printing cement based ink, and it’s application within the construction industry’, *MATEC Web of Conferences*. Vol. 120, p. 02003. doi: 10.1051/mateconf/201712002003.

KAZEMIAN, Ali., YUAN, Xiao., COCHRAN, Evan., KHOSHNEVIS, Behrokh. (2017) ‘Cementitious materials for construction-scale 3D printing: Laboratory testing of fresh printing mixture’, *Construction and Building Materials*. ISSN 09500618. Elsevier Ltd Vol.145 (2017), p. 639–647. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.04.015.

KHOSHNEVIS, Behrokh. (2004) ‘Automated construction by contour crafting - Related robotics and information technologies’, *Automation in Construction*. ISSN 09265805. Vol. 13 n° 1 (2004), p. 5–19. doi: 10.1016/j.autcon.2003.08.012.

KLOTZ, Leidy and BODENSCHATZ Mark, M. H. (2007) ‘A Lean Modeling Protocol for Evaluating Green Project Delivery’, *Lean Construction Journal*. ISSN 1555-1369. Vol. 3 (April 2007), 18p.

KOSMATKA, Steven H., WILSON, Michelle L. (2011) - *Design and Control of Concrete Mixtures – The Guide to Applications, Methods and Materials*. 15<sup>a</sup> ed. Washington DC: Portland Cement Association, 2011. 444p. ISBN 0-89312-272-6.

KRUTH, J. P. MERCELIS, P. Van VAERENBERGH, J. FROYEN, L. ROMBOUTS, M. (2005) ‘Binding mechanisms in selective laser sintering and selective laser melting’, *Rapid Prototyping Journal*. Emerald Group Publishing Limited. Vol. 11(1), p. 26–36. doi: 10.1108/13552540510573365.

LE, T. T., AUSTIN, S. A., LIM, S., BUSWELL, R. A., GIBB, A. G. F., THORPE, T. (2012) '*Hardened properties of high-performance printing concrete*', *Cement and Concrete Research*. ISSN 00088846. Vol. 42 n° 3 (2012), p. 558–566. doi: 10.1016/j.cemconres.2011.12.003.

LEE, Jian Y., AN, Jia and CHUA, Chee K. (2017) '*Fundamentals and applications of 3D printing for novel materials*', *Applied Materials Today*. Elsevier Ltd. ISSN 23529407. Vol. 7 (2017), p. 120–133. doi: 10.1016/j.apmt.2017.02.004.

LIM, S., BUSWELL, R. A., LE, T. T., AUSTIN, S. A., GIBB, A. G. F., THORPE, T. (2012) '*Developments in construction-scale additive manufacturing processes*', *Automation in Construction*. Vol. 21(1), p. 262–268. doi: 10.1016/j.autcon.2011.06.010.

LIU, J., SUN, W., MIAO, C., LIU, J., LI, C. (2012) '*Assessment of fiber distribution in steel fiber mortar using image analysis*', *Journal Wuhan University of Technology, Materials Science Edition*. ISSN 10002413. Vol. 27 n° 1 (2012), p. 166–171. doi: 10.1007/s11595-012-0429-z.

MA, Guowei., LI, Zhijian and WANG, Li. (2018) '*Printable properties of cementitious material containing copper tailings for extrusion based 3D printing*', *Construction and Building Materials*. Elsevier Ltd. ISSN 09500618. Vol. 162 (2018), p. 613–627. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.12.051.

MALAEB, Z., HACHEM, H., TOURBAH, A., MAALOUF, T., EL ZARWI, N., HAMZEH, F. (2015) '*3D Concrete Printing : Machine and Mix Design*', *International Journal of Civil Engineering and Technology*. ISSN 0976-6316. Vol. 6(6) (2015) p. 14–22.

MARGALHA, Maria G. (2007) '*Argamassas - Conservação e Recuperação do Património*'. Universidade de Évora. Documento de apoio as aulas de conservação e recuperação de património. 32p.

METEYER, S., XU, X., PERRY, N., ZHAO, Y. F. (2014) '*Energy and material flow analysis of binder-jetting additive manufacturing processes*', *Procedia CIRP*. Elsevier B.V. ISSN 22128271. Vol. 15 (2014), p. 19–25. doi: 10.1016/j.procir.2014.06.030.

MIKANOVIC, Nikola and JOLICOEUR, Carmel. (2008) '*Influence of superplasticizers on the rheology and stability of limestone and cement pastes*', *Cement and Concrete Research*. ISSN 00088846. Vol. 38 n° 7 (2008), p. 907–919. doi: 10.1016/j.cemconres.2008.01.015.

NASIR, H., AHMED, H., HAAS, C., GOODRUM, P. M. (2014) '*An analysis of construction productivity differences between Canada and the United States*', *Construction Management and Economics*. Routledge. ISSN 1466433X. Vol. 32(6) (2014), p. 595–607. doi: 10.1080/01446193.2013.848995.

NGO, T. D., KASHANI, A., IMBALZANO, G., NGUYEN, K. T. Q., HUI, D. (2018) '*Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges*', *Composites Part B: Engineering*. Elsevier. Vol. 143(December 2017), p. 172–196. doi: 10.1016/j.compositesb.2018.02.012.

NOUSHINI, Amin, SAMALI, Bijan and VESSALAS, Kirk. (2013) '*Effect of polyvinyl alcohol (PVA) fibre on dynamic and material properties of fibre reinforced concrete*',

*Construction and Building Materials*. Elsevier Ltd. ISSN 09500618. Vol. 49 (October 2018), p. 374–383. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.08.035.

NP EN 196-1:2016 Métodos de teste de cimento Parte 1 Determinação de força. Comitê Europeu de Normalização.

NP EN 197-1:2012 Cimento ; Parte 1: Composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos correntes, Instituto Português da Qualidade.

PANDA, B., CHANDRA PAUL, S. and JEN TAN, M. (2017) '*Anisotropic mechanical performance of 3D printed fiber reinforced sustainable construction material*', *Materials Letters*. Elsevier B.V. ISSN 18734979. Vol. 209 (2017), p. 146–149. doi: 10.1016/j.matlet.2017.07.123.

PEGNA, Joseph. (1997) '*Exploratory investigation of solid freeform construction*', *Automation in Construction*. ISSN 09265805. Vol. 5(5) (1997), p. 427–437. doi: 10.1016/S0926-5805(96)00166-5.

PETRUCCI, Eládio. G. R. (1980) - *Materiais de Construção*. 5º Ed. Porto Alegre: Editora Globo Porto Alegre, 1980. 435p.

PRINCE, J. Dale. (2014) '*3D Printing: An Industrial Revolution*', *Journal of Electronic Resources in Medical Libraries*. Vol. 11(1) (2014), p. 39–45. doi: 10.1080/15424065.2014.877247.

RUBIO, Marine., SONEBI, M. and AMZIANE, S. (2017) '*3D Printing of Fibre Cement-Based Materials : Fresh and Rheological Performances*' *HAL archives-ouvertes.fr*, p. 10.

SABBATINI, Fernando H. (1998) - *Alvenaria resistente para paredes de argamassas de assentamento*. 2ªEd. São Paulo: ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland), 1998. 44p. (ET-91).

TARELHO, L. A. C., TEIXEIRA, E. R., SILVA, D. F. R., MODOLO, R. C. E., SILVA, J. J. F. (2012) '*Characteristics, Management and Applications of Ashes From Thermochemical Conversion Of Biomass To Energy*', *Conference&Exhibition on Biomass for Energy*. ISSN 1098-6596. Vol. 53(Maio 2012), 160p. doi: 10.1017/CBO9781107415324.004.

TAY, Y. W. D., PANDA, B., PAUL, S. C., MOHAMED, N. A. M., TAN, M. J., LEONG, K. F. (2017) '*3D printing trends in building and construction industry: a review*', *Virtual and Physical Prototyping*. Taylor & Francis. ISSN 17452767. Vol. 12(3) (2017), p. 261–276. doi: 10.1080/17452759.2017.1326724.

THOMPSON, S. M., BAIN, L., SHAMSAEI, N., YADOLLAHI, A. (2015) '*An overview of Direct Laser Deposition for additive manufacturing; Part I: Transport phenomena, modeling and diagnostics*', *Additive Manufacturing*. Elsevier B.V. Vol. 8 (2015), p. 36–62. doi: 10.1016/j.addma.2015.07.001.

TORRADO, A. R., SHEMELYA, C. M., ENGLISH, J. D., LIN, Y., WICKER, R. B., ROBERSON, D. A. (2015) '*Characterizing the effect of additives to ABS on the mechanical property anisotropy of specimens fabricated by material extrusion 3D printing*', *Additive Manufacturing*. Elsevier B.V. ISSN 22148604. Vol. 6 (2015), p. 16–29. doi: 10.1016/j.addma.2015.02.001.

VAIDYA, Saurabh., AMBAD, Prashant and BHOSLE, Santosh. (2018) *Industry 4.0 - A Glimpse*, *Procedia Manufacturing*. Elsevier B.V. ISSN 23519789. Vol. 20 (2018), p. 233–238. doi: 10.1016/j.promfg.2018.02.034.

VIEIRA, João E. R. (2012) - Funcionalização de argamassas para controlo das condições ambiente. Aveiro: Universidade de Aveiro. Tese de mestrado. 84p.

WEINWESMITH, Kelly and WEINWESMITH, Zach. (2018) *LOGO, LOGO*. Dez novas tecnologias que vão melhorar e/ou arruinar tudo. 1ª Ed. Rio de Janeiro: Editora Intrínseca Ltda, 2018. 220p. ISBN 978-85-510-0334-3.

WISHBOX (2020) 6 iniciativas com impressora 3D contra o coronavírus, 8 de maio. Available at: <https://www.wishbox.net.br/blog/impressora-3d-coronavirus/#btn-continuar-lendo> (Acesso em: 26 de maio de 2020).

WOLFCRAFT (2020). Produtos/misturador de argamassas. Disponível em: [http://www.wolfcraft.pt/pt/produtos/p/misturador\\_de\\_argamassa\\_e\\_cola-1/s/c/index.html](http://www.wolfcraft.pt/pt/produtos/p/misturador_de_argamassa_e_cola-1/s/c/index.html) (Acesso em: 1 de novembro de 2020).

WU, Peng., WANG, Jun. and WANG, Xiangyu. (2016) *'A critical review of the use of 3-D printing in the construction industry'*, *Automation in Construction*. Elsevier B.V. ISSN 09265805. Vol. 68 (2016), p. 21–31. doi: 10.1016/j.autcon.2016.04.005.

# ANEXOS

## Anexo A – Ficha técnica do Cimento Portland tipo CEM II/B-L 42,5R

### CEM II/B-L 42,5R CIMENTO PORTLAND DE CALCÁRIO



**Locais de Produção**  
Fábrica Secil-Outão  
Fábrica Maceira-Liz

**Embalagem**  
Granel

**Certificação**  
Cimento certificado segundo a NP EN 197-1.  
Certificados de Regularidade do Desempenho e Declarações de Desempenho  
0856-CPR-0169 (Secil-Outão) e 0856-CPR-0167 (Maceira-Liz)

<b>Composição do Produto (Núcleo Cimento)</b>	65% a 79% Clinquer Portland 21% a 35% Calcário 0% a 5% Outros Constituintes
<b>Principais Características</b>	Cimento de cor cinzenta, com menor calor de hidratação e melhor trabalhabilidade que um cimento CEM I da mesma classe de resistência. Desenvolvimento rápido de resistências (resistência inicial elevada). Resistências finais dentro dos valores da classe indicada (resistências aos 28 dias). Bom efeito de parede em produtos de face à vista e minimização da segregação (melhoria dos acabamentos). Facilidade de bombagem e colocação em obra.
<b>Principais Aplicações</b>	O Cimento Portland de calcário CEM II/B-L 42,5R é um produto de grande versatilidade, conjugando uma boa trabalhabilidade com uma boa performance ao nível das resistências mecânicas, características que permitem o seu uso em betões de várias classes de resistência e na prefabricação ligeira. O Cimento CEM II/B-L 42,5R é um produto especialmente formulado e adaptado para: <ul style="list-style-type: none"> <li>• betão pronto ou fabricado em obra de média resistência;</li> <li>• prefabricação ligeira de grande rotatividade;</li> <li>• betões projetados, betões leves e betões de regularização;</li> <li>• betão para pavimentos, bases e camadas de desgaste rodoviárias.</li> </ul>
<b>Advertências Específicas</b>	O correto desenvolvimento de resistências é sensível ao processo de cura. <ul style="list-style-type: none"> <li>• devem tomar-se cuidados para evitar a dissecação de todas as peças betonadas;</li> <li>• devem evitar-se betonagens em tempo muito quente ou muito frio.</li> </ul> Para obter a melhor performance em betões e argamassas: <ul style="list-style-type: none"> <li>• recomenda-se o estudo de composição otimizado, para os agregados em uso.</li> <li>• recomenda-se um controlo e monitorização da dosagem de água de amassadura. O ajuste deste parâmetro, com eventual correção da dosagem de adjuvante, poderá conduzir a uma performance melhorada.</li> </ul>
<b>Informação de Segurança</b>	O manuseamento do cimento em pó pode causar irritação dos olhos e vias respiratórias. Quando misturado com água pode ainda causar sensibilização da pele. Aconselha-se o uso de máscara anti-poeiras, de óculos para proteção dos olhos e luvas e fato de trabalho para proteção das mãos e pele. Para informação detalhada consulte a Ficha de Dados de Segurança.



**CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS**

Propriedades	Método de Ensaio	Valor Especificado (1)
Teor de Sulfatos (em SO <sub>3</sub> )	NP EN 196-2	≤ 4,0%
Teor de Cloretos	NP EN 196-2	≤ 0,10%

(1) As percentagens são referentes à massa de cimento.

**CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS**

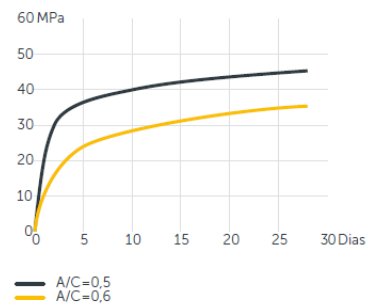
**Resistência à Compressão (MPa)**

Resistência aos primeiros dias		Resistência de referência	NP EN 196-1
2 dias	7 dias	28 dias	
≥ 20	-	≥ 42,5 e ≤ 62,5	

**CARACTERÍSTICAS FÍSICAS**

Propriedades	Método de Ensaio	Valor Especificado
Princípio de Presa	NP EN 196-3	≥ 60 min
Expansibilidade	NP EN 196-3	≤ 10 mm

Valores médios indicativos da resistência à compressão de betão fabricado com 350 kg/m<sup>3</sup> de cimento CEM II/B-L 42,5R



**Direção Executiva Portugal Cimentos**

Av. Eng.º Duarte Pacheco  
19, 7º, 1070-100 Lisboa

Tel - 217927100

**Direção Nacional de Vendas**

Tel - 217 927 100

**Vendas Norte**

Tel - 226 078 410

**Vendas Centro**  
Tel - 244 779 500

**Vendas Sul**  
Tel - 212 198 280

**Vendas Técnicas**  
Tel - 212 198 280

**Cimento Branco**  
Tel - 244 779 500

Última atualização: maio 2018 - Versão 3

## Anexo B – Ficha técnica da cinza volante



CENTRO DE PRODUÇÃO SINES  
 SISTEMA DE CONTROLO DA PRODUÇÃO DE CINZAS VOLANTES  
 FICHA TÉCNICA DE CINZAS VOLANTES

Pág. 1/1

### 1. IDENTIFICAÇÃO DO PRODUTO/PRODUTOR

**Identificação do Produto:** Cinza Volante - Tipo B e Classe N (sem co-combustão)

**Aplicação do Produto:** Adição no betão

**Identificação do Produtor:** EDP - Gestão da Produção de Energia, S.A.  
 Centro de Produção Sines  
 Apartado 46 - São Torpes  
 7520-089 Sines

### 2. CARACTERÍSTICAS DA CINZA (referência)

Características	Valor
Perda ao Fogo (%)	≤7
Finura (%)	16 (VD)
Óxido de Cálcio livre (%)	≤ 1,6
Óxido de Cálcio total (%)	≤ 10
Cloretos (%)	≤ 0,10
Sulfatos (%)	≤ 3
Densidade das Partículas (Kg/m <sup>3</sup> )	2 300 (VD)
Índice de Actividade: (%)	
28 dias	> 75
90 dias	> 85

VD – Valor Declarado

**Revisão**

D

**Data**

17-11-2014

**Elaborado**



Marisa Abadeço

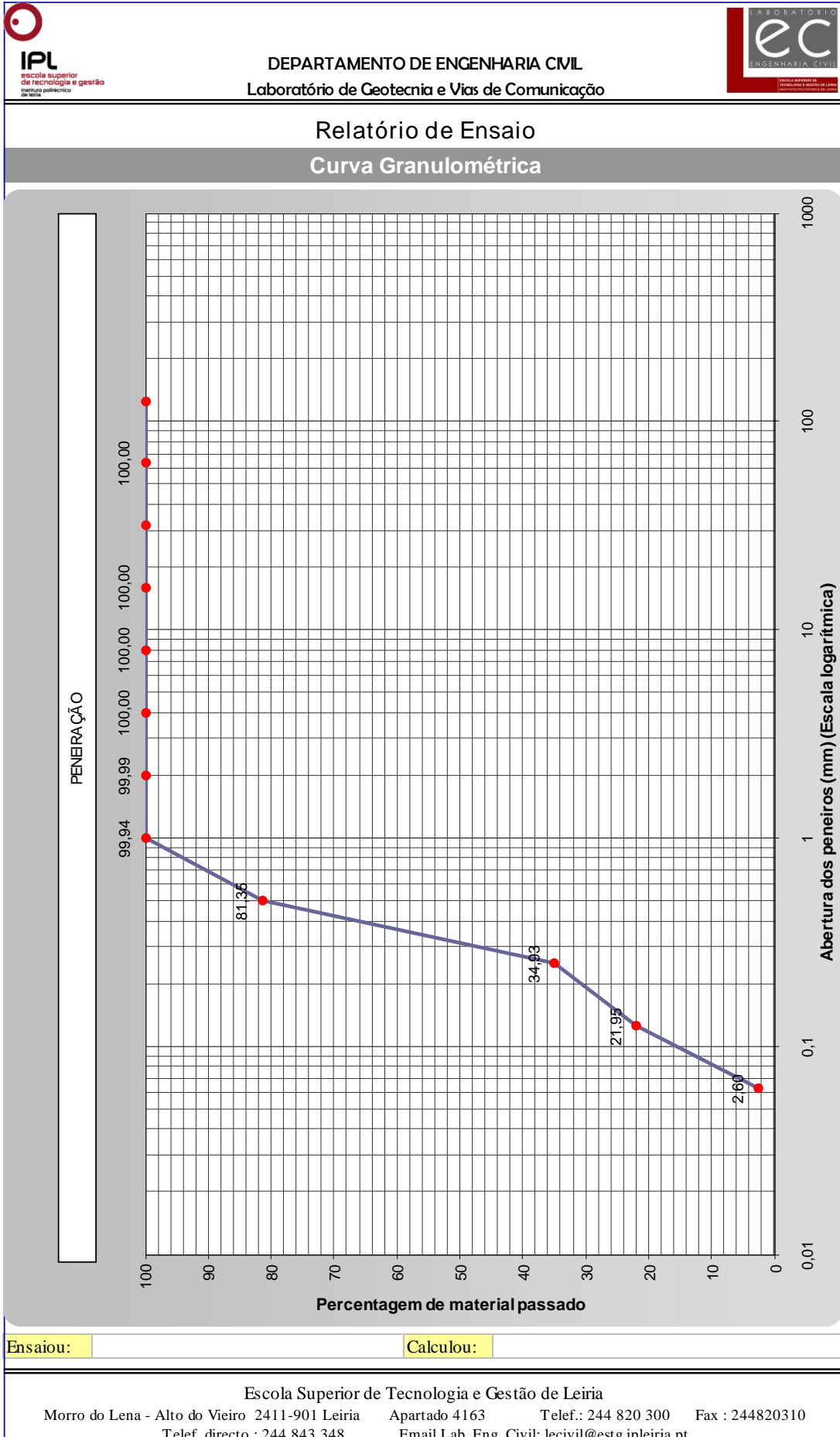
**Aprovado**

João Amaral

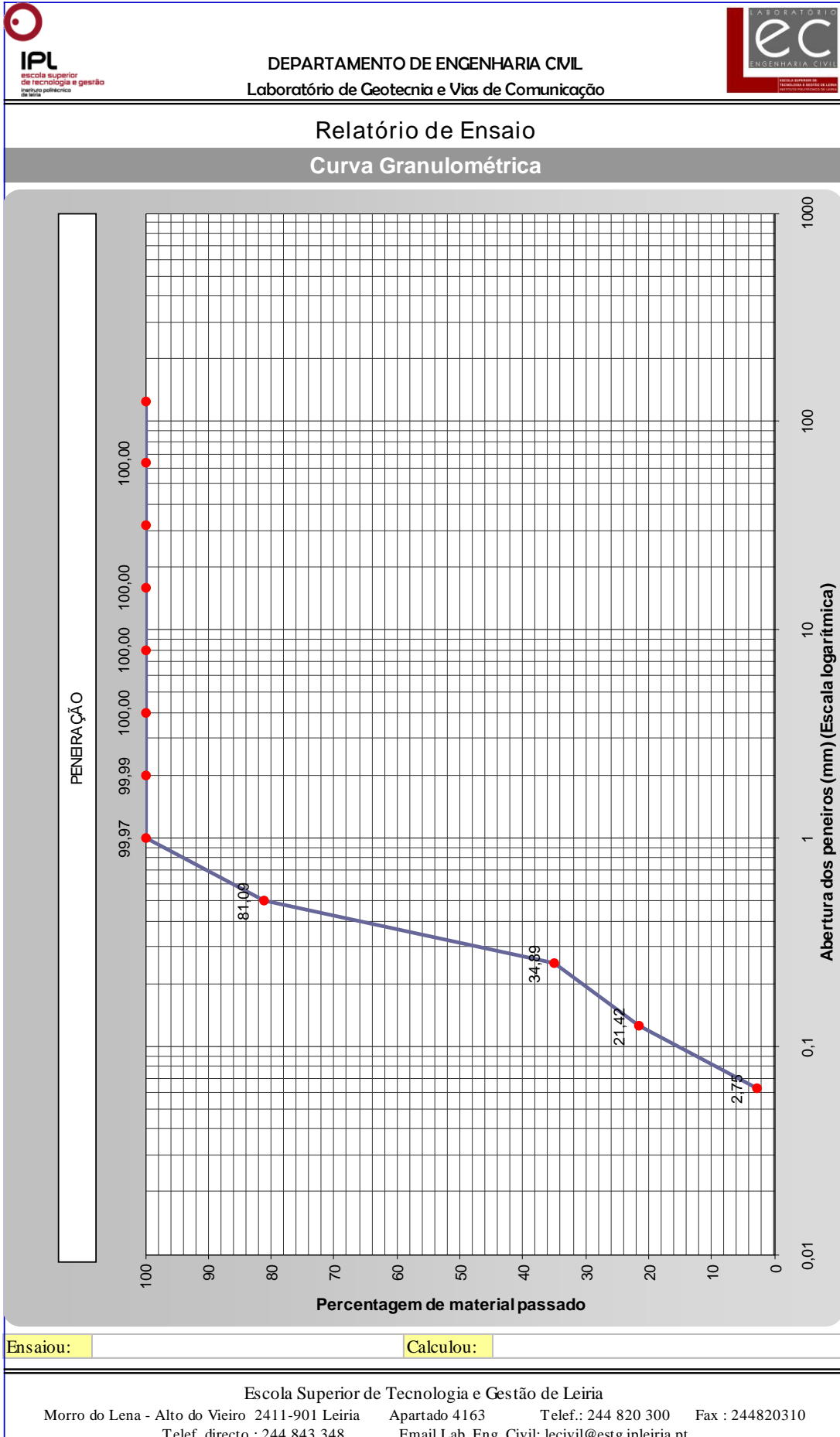
(em documento SGD)

Anexo C – Ficha técnica da análise granulométrica do pó de pedra calcária

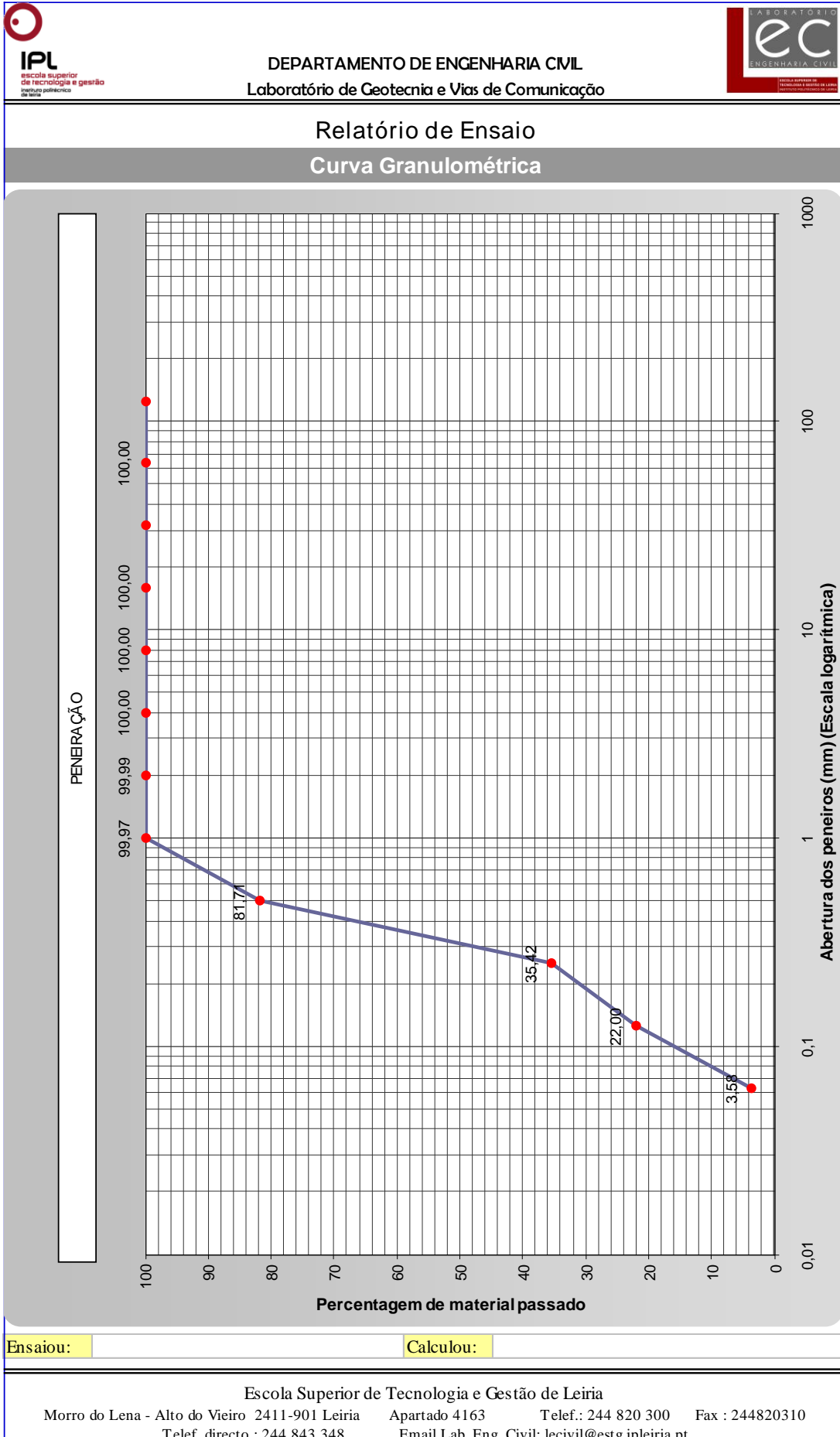
 <b>IPL</b> <small>Escola Superior de tecnologia e gestão</small> <small>de engenharia</small>		DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL Laboratório de Geotecnia e Vias de Comunicação			
<b>Relatório de Ensaio</b>					
<b>Análise Granulométrica de Agregados</b>					
Processo n.º					
Amostra n.º					
Requerente					
Obra	.....				
Inerte					
Proveniência	.....				
Norma utilizada	NP EN 933-2 1999	Observações			
Entrado em					
Recibo n.º					
Massa seca total $M_1$ :      3000      g      Massa seca após lavagem $M_2$ 3000					
Massa seca de finos após lavagem $M_{1,M2}$ :      0					
Peneiros		Material Retido			% total que passa
Abertura nominal	mm	Massa ( $R_1$ ) g	Percentagem ( $m_2 / m_1$ ) %	Percentagem corrigida ( $m_2 / m_1 \times C$ ) %	
<b>125,0</b>		0,00	0,00	0,00	<b>100,00</b>
<b>63,0</b>		0,00	0,00	0,00	<b>100,00</b>
<b>31,5</b>		0,00	0,00	0,00	<b>100,00</b>
<b>16,0</b>		0,00	0,00	0,00	<b>100,00</b>
<b>8,0</b>		0,00	0,00	0,00	<b>100,00</b>
<b>4,00</b>		0,00	0,00	0,00	<b>100,00</b>
<b>2,00</b>		0,27	0,01	0,01	<b>99,99</b>
<b>1,00</b>		1,61	0,05	0,05	<b>99,94</b>
<b>0,500</b>		556,90	18,56	18,59	<b>81,35</b>
<b>0,250</b>		1390,91	46,36	46,42	<b>34,93</b>
<b>0,125</b>		388,77	12,96	12,98	<b>21,95</b>
<b>0,063</b>		579,83	19,33	19,35	<b>2,60</b>
<b>&lt; 0,063</b>		77,80	2,59	2,60	<b>0,00</b>
		2996,09	99,87	100,00	
$(M_1 - M_2) + P / M_1 \times 100$		Percentagem de finos	2,59%		
$m_f$		Massa final do provete	g	2996,09	
$C = m_f / m_t$		Coeficiente correção	1,00		
$(M_2 - (R_1 + P) / M_2) \times 100$		Perda de material	%		
			2,72%		
Ensaiou					Calculou:
Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Leiria Morro do Lena - Alto do Vieiro 2411-901 Leiria Apartado 4163 Telef.: 244 820 300 Fax : 244820310 Telef. directo.: 244 843 348 Email Lab. Eng. Civil: lecivil@estg.ipleiria.pt					











## Anexo D – Ficha técnica do superplastificante (Sika ViscoCrete – 1143)

Construction

Ficha de Produto  
 Edição de dezembro de 2017  
 Nº de identificação: 01.013  
 Versão nº 2  
 Sika® ViscoCrete®-1143

### Sika® ViscoCrete® -1143

Adjuvante para betão

---

**Descrição do produto** Sika® ViscoCrete®-1143 é um plastificante/ redutor de água para betão.

---

**Utilizações**

- Para betões correntes em central de betão pronto ou em obra.
- Betões com manutenção da consistência elevada.
- Betões com reduzido teor em ligante.

---

**Características/ Vantagens**

- Relação desempenho/custo favorável.
- Gama de dosagem alargada.
- Robusto em relação à segregação.
- Optimização do teor de ligante da mistura.
- Aumento das resistências mecânicas.
- Melhoria da impermeabilidade.
- Isento de cloretos.

---

**Certificados/ Boletins de Ensaio** Conforme as especificações da norma EN 934-2: Q10.

---

**Dados do produto**

**Aspecto / Cor** Líquido acastanhado.

---

**Fornecimento** 212 kg; 1.060 kg; granel.

---

**Armazenagem e conservação** O produto conserva-se durante 12 meses a partir da data de fabrico, na embalagem original não encetada, a temperaturas entre +5 e +30 °C. Armazenar em local seco e ao abrigo da luz solar directa.

---

**Dados técnicos**

**Base química** Mistura de poliacarboxilatos e aditivos.

---


**Massa volúmica (23 ± 2 °C)** 1,06 ± 0,02 kg/dm³.

---

**pH (23 ± 2 °C)** 5,0 ± 1,0.

---

**Teor em cloretos** ≤ 0,1%.



Sika® ViscoCrete®-1143 1/3

## Informação sobre o sistema

### Particularidades de aplicação

<b>Consumo/ Dosagem</b>	<p><b>Dosagem corrente:</b> Usar 0,5% a 2,0% sobre o peso do cimento.</p> <p>Para baixas temperaturas associadas a ligantes com elevadas percentagens de adições, deve ser usada uma dosagem mais baixa, para evitar retardamentos excessivos.</p>
-------------------------	--

### Instruções de aplicação

<b>Mistura</b>	<p>Preparar o betão com cerca de <math>\frac{2}{3}</math> da água prevista e adicionar o adjuvante misturando aprox. 1 minuto/m<sup>3</sup>; adicionar água até à consistência desejada – aproveitamento máximo do adjuvante e controlo da razão água/ligante. Se o processo não for viável adicionar o produto à água de amassadura determinada e misturar o betão até obter uma mistura homogénea. Não adicionar o adjuvante aos componentes secos (redução de eficácia).</p> <p>No caso de redosagem em obra: diluição ligeira do adjuvante para reduzir a sua viscosidade e facilitar a incorporação. “Puxar” o betão acima e adicionar lentamente o adjuvante, com o tambor a rodar rapidamente; se necessário inverter o sentido de rotação para ajudar a homogeneizar. Tempo de mistura mínimo: 3 minutos.</p>
----------------	---

<b>Aplicação</b>	Sika® ViscoCrete® -1143 PT permite o fabrico de betão de qualidade, consequentemente devem ser cumpridas as regras de boa prática para o fabrico, a colocação e a cura do betão.
------------------	--

<b>Limpeza de ferramentas</b>	Limpar todas as ferramentas e equipamento com água imediatamente após a utilização. Material curado/endurecido só pode ser removido mecanicamente.
-------------------------------	--

<b>Importante</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Recomenda-se a realização de ensaios prévios para se encontrar a dosagem ótima do adjuvante e sempre que se altere os componentes do betão ou a própria composição.</li> <li>■ Com geada intensa o adjuvante pode gelar, porém uma vez descongelado lentamente, agitado cuidadosamente e verificada a homogeneidade, poderá voltar a empregar-se.</li> </ul> <p>Para qualquer esclarecimento, consultar o Departamento Técnico Sika.</p>
-------------------	---

<b>Nota</b>	Todos os dados técnicos referidos nesta Ficha de Produto são baseados em ensaios laboratoriais. Resultados obtidos noutras condições podem divergir dos apresentados, devido a circunstâncias que não podemos controlar.
-------------	--

### Risco e segurança

<b>Medidas de segurança</b>	Para informações complementares sobre o manuseamento, armazenagem e eliminação de resíduos do produto consultar a respectiva Ficha de Dados de Segurança e o rótulo da embalagem.
-----------------------------	---

Construction

"O produto está seguro na C<sup>2</sup> Seguros XL Insurance Switzerland (Apólice nºCH00003018LI05A), a título de responsabilidade civil do fabricante".

A informação e em particular as recomendações relacionadas com aplicação e utilização final dos produtos Sika são fornecidas em boa fé e baseadas no conhecimento e experiência dos produtos sempre que devidamente armazenados, manuseados e aplicados em condições normais, de acordo com as recomendações da Sika. Na prática, as diferenças no estado dos materiais, das superfícies, e das condições de aplicação em obra, são de tal forma imprevisíveis que nenhuma garantia a respeito da comercialização ou aptidão para um fim em particular nem qualquer responsabilidade decorrente de qualquer relacionamento legal poderão ser inferidas desta informação, ou de qualquer recomendação por escrito, ou de qualquer outra recomendação dada. O produto deve ser ensaiado para aferir a adequabilidade do mesmo à aplicação e fins pretendidos. Os direitos de propriedade de terceiros deverão ser observados. Todas as encomendas aceites estão sujeitas às nossas condições de venda e de entrega vigentes. Os utilizadores deverão sempre consultar a versão mais recente da nossa Ficha de Produto específica do produto a que diz respeito, que será entregue sempre que solicitada.

#### Marcação CE

A Norma Europeia EN 934-2:2009+A1:2012 "Adjuvantes para betão, argamassa e caldas de injeção. Parte 2: Adjuvantes para betão. Definições, requisitos, conformidade, marcação e rotulagem" especifica as definições e os requisitos dos adjuvantes para uso no betão. Abrange adjuvantes para betão simples, armado e pré-esforçados usados no betão fabricado no local da obra, no betão pronto e no betão fabricado em centrais de produção de elementos prefabricados. Nesta norma os requisitos de desempenho aplicam-se a adjuvantes usados no betão de consistência normal. Eles podem não ser aplicáveis a adjuvantes para outros tipos de betão tais como betões meio secos e de consistência terra húmida.



Sika Portugal, SA  
R. de Santarém, 113  
4400-292 V. N. Gaia  
Portugal  
Tel.: +351 22 377 69 00  
Fax: +351 22 370 20 12  
prt.sika.com



Sika® ViscoCrete® - 1143 PT 3/3

## Anexo E – Ficha técnica do acelerador de presa (MasterX-Speed 130)



The Chemical Company

# MasterX-Seed 130

Antes: X-SEED 130

## Agente activador da hidratação do cimento e que desencadeia o desenvolvimento das resistências iniciais e finais do betão

### DESCRIÇÃO

MasterX-Seed 130 é uma suspensão de núcleos de cristalização à nanodimensão, especialmente desenvolvida para desencadear o processo de hidratação do cimento nas idades iniciais (6-16h).

Assente em inovadora tecnologia, a formação de cristais de silicatos cálcicos hidratados é fortemente acelerada.

MasterX-Seed 130 favorece o desenvolvimento das resistências iniciais do betão em qualquer temperatura mesmo com cura térmica.

Contrariamente aos aceleradores tradicionais, a sua tecnologia única, permite o desenvolvimento de cristais entre as partículas de cimento, melhorando o desenvolvimento de resistências iniciais, sem afectar as resistências finais, inclusive melhorando-as construindo uma microestrutura mais fechada que favorece a durabilidade do betão.



O benefício de MasterX-Seed 130 pode resumir-se em vários pontos:

- Processo eficiente;
- Redução de energia consumida;
- Optimização de materiais;
- Elevada qualidade no betão produzido.

A contribuição MasterX-Seed 130 é bastante relevante dado que melhora significativamente alguns dos requisitos chave da indústria do betão.

Em particular, MasterX-Seed 130 foi criado para melhorar o processo produtivo, reduzindo a energia necessária no processo e melhorar a qualidade e durabilidade das peças de betão, permitindo uma construção mais sustentável.

### CAMPOS DE APLICAÇÃO

MasterX-Seed 130 é indicado para qualquer tipo de betão e especialmente para elementos estruturais onde sejam necessárias elevadas resistências iniciais. MasterX-Seed 130 é uma alternativa aos métodos tradicionais de cura e destaca-se pelas suas prestações com temperaturas muito baixas e cimentos com pouco clinker e de menor classe de resistência.

### VANTAGENS

- MasterX-Seed 130 oferece as seguintes vantagens:
- Elevadas resistências iniciais a qualquer temperatura, mesmo com cura térmica;
- Flexibilidade e optimização na produção;
- Redução dos ciclos de produção (possibilidade de duplicar a produção);
- Maior rendimento das cofragens por maior rotação;
- Redução / eliminação da cura térmica;
- Eliminação dos custos para instalações de cura e sua manutenção;
- Permite utilizar a quantidade mínima de cimento necessária;
- Permite o uso de cimentos com menor quantidade de clinker e menor classe de resistências assim como a utilização de adições.

### MODO DE UTILIZAÇÃO

MasterX-Seed 130 é um adjuvante líquido pronto a ser usado. Adiciona-se ao betão durante o processo de amassadura. Deverá ser respeitado o tempo mínimo de amassadura para que seja assegurada a sua dispersão homogénea.

### RENDIMENTO / DOSAGEM

A dosagem recomendada é de 1,0 a 3,0 % sobre o peso do cimento. Dosagens diferentes das recomendadas são possíveis desde que realizados os respectivos ensaios prévios e/ou para determinar a dosificação óptima.

### DEVE TER-SE EM CONTA

Recomenda-se sempre a realização de ensaios prévios à utilização do adjuvante para ajustar a dosagem ideal. Não usar em dosagens inferiores ou superiores sem a prévia consulta ao nosso departamento técnico. Não adicionar a outros adjuvantes sem prévia consulta.

### PRECAUÇÕES DE SEGURANÇA

Recomenda-se observar as precauções habituais quando se trabalha com produtos químicos, utilizando luvas e óculos de protecção. Lavar as mãos entre as pausas e no final do trabalho. Não comer, beber ou fumar durante a aplicação.



## MasterX-Seed 130

Antes: X-SEED 130

### Agente activador da hidratação do cimento e que desencadeia o desenvolvimento das resistências iniciais e finais do betão

A eliminação do produto e da embalagem deve realizar-se segundo a legislação em vigor e é da responsabilidade do utilizador final.

Para mais informação, consultar a ficha de segurança do produto.

#### COMPATIBILIDADE

MasterX-Seed 130 é compatível com todas as tecnologias principais da BASF, em particular com:

Gama de superplastificantes MasterGlenium;

Agente modificador de viscosidade MasterMatrix para aumentar a robustez no betão autocompactável;

Gama de descofrantes MasterFinish para facilitar a descofragem e melhorar os acabamentos superficiais.

#### EMBALAGEM E ARMAZENAMENTO

O MasterX-Seed 130 é fornecido em jerricans de 25 kg. Armazenar em local fresco e seco, a temperaturas superiores a 5°C. Evitar a sua congelação. Em caso de congeloamento a sua reconstituição poderá ser efectuada mediante agitação mecânica suave.

No caso de armazenamento prolongado, é aconselhável agitar o produto antes da sua utilização, por forma a se homogeneizar o produto.

Nas suas embalagens originais fechadas e nestas condições o seu tempo de armazenamento é de 9 meses.

Características técnicas	
Função principal:	Activador da hidratação do cimento
Aspecto:	Líquido branco
Marcação CE	Segundo EN 934-2 como T7
Densidade relativa (20°C):	1,130 ± 0,03 g/cm <sup>3</sup>
pH:	11,3 ± 1
Viscosidade Brookfield (20°C):	< 75 cps
Teor em iões cloreto:	< 0,01%
Os dados técnicos aqui apresentados são fruto de resultados estatísticos. Caso se pretendam valores de controlo, podem ser solicitados ao nosso Departamento Técnico.	



MARCAÇÃO CE DE PRODUTO SOB A  
DIRECTIVA UE DE PRODUTOS DE  
CONSTRUÇÃO DA UNIÃO EUROPEIA



The Chemical Company

## MasterX-Seed 130

Antes: X-SEED 130

**Agente activador da hidratação do cimento e que desencadeia o desenvolvimento das resistências iniciais e finais do betão**

### NOTA:

A presente Ficha Técnica serve, assim como as demais recomendações e informação técnica, unicamente para a descrição das características do produto, modo de utilização e suas aplicações. Os dados e informações reproduzidos têm por base os nossos conhecimentos técnicos adquiridos através de biografia, ensaios de laboratório e através da prática.

Os dados de consumo e dosificação que figuram nesta ficha técnica, são baseados na nossa própria experiência, pelo que são susceptíveis de variações devido a diferentes condições de obra. Os consumos e dosificações reais deverão determinar-se através de ensaios prévios sendo estes responsabilidade do cliente.

Para um acompanhamento adicional, o nosso serviço técnico, está à sua disposição.

BASF Portuguesa, S.A. reserva o direito de modificar a composição dos produtos, sempre e quando estes continuem cumprindo as características descritas na Ficha Técnica.

Outras aplicações do produto que não se enquadrem com as indicadas, não serão da nossa responsabilidade.

Outorgamos garantia em caso de defeito na qualidade de produção dos nossos produtos, ficando excluídas as reclamações adicionais, sendo da nossa responsabilidade tão só a de compensar o valor de mercadoria fornecida.

Deve ser tido em conta as eventuais reservas correspondentes a patentes ou direito de terceiros.

**Edição: 27/03/2014**

A presente ficha técnica perde a sua validade com a emissão de uma nova

### CONTACTO:

**BASF Portuguesa, S.A.**

Rua 25 de Abril, n.º 1

2689-538 PRIOR-VELHO

Tel: 21 949 99 00 / Fax: 21 949 99 45

**Encomendas EBE:**

Tel.: 21 949 99 30 / Fax.: 21 949 99 48

[encomendas-ebeportugal@basf.com](mailto:encomendas-ebeportugal@basf.com)

[geral-ebeportugal@basf.com](mailto:geral-ebeportugal@basf.com)

Del. Norte: Rua Manuel Pinto de Azevedo, 626

4100-320 PORTO

Tel: 22 615 96 00 / Fax: 22 617 75 10

[www.master-builders-solutions.basf.pt](http://www.master-builders-solutions.basf.pt)

**Anexo F – Certificado de qualidade das fibras (Fibtex Repsol Classe II)**

**CERTIFICADO DE QUALIDADE**

**Interno** – Q252/Junho/2010  
( Segundo Norma EN 14889-2:2006 CE )

IDENTIFICAÇÃO:

Produto: ~~FIBTEX~~ BA PP 6D 12  
Lote : 252/Junho/2010  
Cliente :  
Data : 15-05-2010

MATÉRIA PRIMA:

Fornecedor : REPSOL – Química, S.A.  
Produto : PP 084Y1E Polipropileno  
Lote : MD1510401  
Tipo : Resina Virgem Homopolimero  
Índice Fluidez : (MFI) 19,30 g/10' - Método MA 553001

DADOS FIBRA / Método

Classe :	II		
Forma :	Deformada		
Tenacidade na ruptura média :	34,5 cN/tex	( +/- 1,1 a 95% )	ISO 5079
Alongamento na ruptura médio :	78 %	( +/- 11 a 95% )	ISO 5079
Diâmetro médio fibras :	31µm	Controlo Interno 6D – Produção/Medição	
Comprimento médio fibras :	12,9 mm	Controlo Interno – Cortadora/Medição	
Corpos duros :	Não Presentes	Controlo Interno – Produção/Inspeção	

Anexo G – Tabela do ensaio de corte



Relatório de Ensaio  
Ensaio de corte directo

Processo n.º		Amostra n.º		Data
Requerente	PL1 Diurno			14/mar/13
Obra				
Norma	PrCEN ISSO/TS 17892-10 : 2003			
Entrado em				
Observações				
Responsável pela entrega da amostra				

Dimensões da caixa de corte

Circular Diâmetro = \_\_\_\_\_ mm  
 Quadrada Comprimento do lado = 60 mm

Área da secção

0,0036 m²

Provete

Altura inicial do provete ( $H_0$ ) = 23 mm  
 Massa do provete húmido ( $m_h$ ) = 109,18 g  
 Massa do provete seco ( $m_s$ ) = 109,16 g  
 Densidade das partículas ( $r_s$ ) = 2,65 g/cm³  
 Índice de vazios inicial ( $e_0$ ) = 1,010  
 Grau de saturação inicial ( $S_{RO}$ ) = 4,619

Massa volumica aparente ( $r$ ) = 1,319 g/cm³  
 Densidade seca inicial ( $r_d$ ) = 1,318 g/cm³  
 Teor em água inicial ( $w_0$ ) = 1,760 %  
 massa provete inicial + caixa(g)= 3004,990 g  
 massa caixa(g)= 2895,810 g

Equipamento Wykeham Farrance

Método de preparação da amostra moldado

Tipo de Teste Não Drenado

Carga no Suporte 0 kg  
 Peso do Suporte 0 kg  
 Velocidade de corte 2 mm/min

Tensão normal aplicada = 0,000 kN/m²  
 Factor de Calibração do Anel NDiv = 1,379

Tempo hh:mm:ss	Deslocamento horizontal mm		Deslocamento vertical mm		Índice de vazios	Força de Corte			Tensão vertical kN/m²	Tensão de corte kN/m²
	Leitura deflectómetro	0,01	Leitura deflectómetro	0,002		Leitura deflectómetro	Diferença de leituras	Força N		
0:00:00	200	0,0000	600	0,0000	1,0100	200	0,0000	0,0000	0,000	0,0000
0:00:30	250	0,5000	600	0,0000	1,0100	194	-6,0000	8,2759	0,000	2,3182
0:01:00	290	0,9000	600	0,0000	1,0100	195	-5,0000	6,8966	0,000	1,9449
0:01:30	375	1,7500	591	-0,0180	1,0085	195	-5,0000	6,8966	0,000	1,9733
0:02:00	432	2,3200	591	-0,0180	1,0085	194	-6,0000	8,2759	0,000	2,3913
0:02:30	480	2,8000	592	-0,0160	1,0086	194	-6,0000	8,2759	0,000	2,4114
0:03:00	520	3,2000	594	-0,0120	1,0090	193	-7,0000	9,6552	0,000	2,8331
0:03:30	572	3,7200	630	0,0600	1,0048	193,5	-6,5000	8,9655	0,000	2,6550
0:04:00	616	4,1600	619	0,0380	1,0067	192	-8,0000	11,0345	0,000	3,2935
0:04:30	665	4,6500	636	0,0720	1,0037	193	-7,0000	9,6552	0,000	2,9073
0:05:00	712	5,1200	663	0,1260	0,9990	193	-7,0000	9,6552	0,000	2,9322
0:05:30	762	5,6200	687	0,1740	0,9948	192,5	-7,5000	10,3448	0,000	3,1705
0:06:00	812	6,1200	700	0,2000	0,9926	193	-7,0000	9,6552	0,000	2,9866
0:06:30	859	6,5900	728	0,2560	0,9877	193	-7,0000	9,6552	0,000	3,0129
0:07:00	908	7,0800	751	0,3020	0,9836	192,5	-7,5000	10,3448	0,000	3,2580
0:07:30	950	7,5000	780	0,3600	0,9786	192,5	-7,5000	10,3448	0,000	3,2841
0:08:00	1005	8,0500	793	0,3860	0,9763	192,5	-7,5000	10,3448	0,000	3,3188
0:08:30	1055	8,5500	870	0,5400	0,9628	192,5	-7,5000	10,3448	0,000	3,3511
0:09:00	1104	9,0400	824	0,4480	0,9709	192,5	-7,5000	10,3448	0,000	3,3833
0:09:30	1153	9,5300	841	0,4820	0,9679	192,5	-7,5000	10,3448	0,000	3,4162
0:10:00	1202	10,0200	851	0,5020	0,9662	192,5	-7,5000	10,3448	0,000	3,4497
0:10:30	1251	10,5100	861	0,5220	0,9644	192,5	-7,5000	10,3448	0,000	3,4838
0:11:00	1302	11,0200	872	0,5440	0,9625	192	-8,0000	11,0345	0,000	3,7548
0:11:30	1350	11,5000	884	0,5680	0,9604	192,5	-7,5000	10,3448	0,000	3,5549
0:12:00	1398	11,9800	898	0,5960	0,9579	192	-8,0000	11,0345	0,000	3,8298
0:12:30	1446	12,4600				192,5				
0:13:00	1486	12,8600								
0:13:30										