



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

Danilo José Pereira Freitas

**Avaliação da construtibilidade e do desempenho mecânico de elementos de concreto com fibras produzidos por manufatura aditiva**

Florianópolis  
2023

Danilo José Pereira Freitas

**Avaliação da construtibilidade e do desempenho mecânico de elementos de concreto com fibras produzidos por manufatura aditiva**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Wellington Longuini Repette, Dr.

Florianópolis  
2023

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Freitas, Danilo José Pereira

Avaliação da construtibilidade e do desempenho mecânico de elementos de concreto com fibras produzidos por manufatura aditiva / Danilo José Pereira Freitas ; orientador, Wellington Longuini Repette, 2023.

115 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2023.

Inclui referências.

1. Engenharia Civil. 2. Concreto de cimento Portland. 3. Impressão 3D de concreto. 4. Microfibras de aço e de polipropileno. 5. Propriedades mecânicas e no estado fresco. I. Repette, Wellington Longuini. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

Danilo José Pereira Freitas

**Avaliação da construtibilidade e do desempenho mecânico de elementos de concreto com fibras produzidos por manufatura aditiva**

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof.(a) Karoline Alves de Melo Moraes, Dr(a).  
Universidade Federal de Alagoas

Prof.(a) Janaíde Cavalcante Rocha, Dr(a).  
Universidade Federal de Santa Catarina

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

---

Coordenação do Programa de  
Pós-Graduação

---

Prof. Wellington Longuini Repette, Dr.  
Orientador

Florianópolis, 2023

Aos meus pais, à minha irmã e aos meus avós,  
pelo apoio incondicional.

## **AGRADECIMENTOS**

À minha família, em especial a minha mãe, Danyela Freitas, meu pai, Luciano Raposo e minha irmã, Anadélia Freitas, pelo apoio incondicional em todos os momentos da minha vida.

Aos meus avós, José Barros, Ana Maria, Olival Freitas e Maria Adélia, pelo apoio e pelo carinho.

A todos os companheiros da UFSC e do NANOTEC, que tornaram o ambiente mais leve. Em especial ao Grupo de Pesquisa em Impressão 3D. Ana Karoliny e Lucas Quintanilha, por todo conhecimento compartilhado, pela parceria durante os períodos de impressão e pela amizade. Sem vocês o desenvolvimento desse trabalho não seria possível.

Aos amigos que ganhei nessa jornada em Floripa. Ana, Igor, Alamanda, Richard, Sell, Nina, Amandas, pelo apoio e pelos bons momentos vividos. A todos os amigos do laboratório, Geannina, Artur, Fernanda, Maira, Patrick e Lucas, por tornarem o ambiente mais leve.

Ao meu orientador Prof. Dr. Wellington Repette, por todo conhecimento compartilhado e pela atenção.

Aos técnicos Renato e Luis do LMCC e a Vanessa do NANOTEC, a todo suporte durante a realização do programa experimental.

A Universidade Federal de Santa Catarina, ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, e a todos que compõe, por todo apoio.

À CAPES e CNPq pelo apoio financeiro que viabilizaram o desenvolvimento dessa pesquisa.

E por fim, agradeço às empresas Concrebras, Max Mohr e MC-Bauchemie, por disponibilizarem os materiais utilizados nesta pesquisa.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

*"A tarefa mais importante de uma pessoa que vem ao mundo é criar algo"*  
*(Paulo Freire)*

## RESUMO

A tecnologia de impressão 3D de concreto, cujo aumento se deu de forma exponencial nos últimos anos, representa, para o setor da construção civil, a solução de deficiências, como baixa produtividade e alta demanda de mão de obra no canteiro de obras. No entanto, a impressão 3D de concreto enfrenta alguns desafios a serem resolvidos. O primeiro deles está relacionado às suas propriedades no estado fresco, à capacidade do material de passar pelo equipamento em fluxo contínuo e à estabilidade de sua forma após o depósito das sucessivas camadas de concreto. Segundo, os desafios relacionados ao seu estado endurecido, à anisotropia dos elementos de concreto impressos e à união entre as camadas depositadas. Por essas razões, o presente estudo propõe incorporar microfibras de polipropileno e de aço em teores variados, a fim de melhorar o desempenho nos estados fresco e endurecido. Logo, o principal objetivo desse trabalho é o de avaliar os elementos de concreto produzidos por impressão 3D com incorporação de microfibras. O estado fresco é analisado pelo ensaio de estabilidade de forma, em que é avaliada a variação vertical da altura das camadas. No estado endurecido, a resistência à compressão e a aderência intercamadas. Em relação ao estado fresco, a incorporação das microfibras não representou efeitos significativos sobre a estabilidade de formas das camadas. A hipótese principal é que o maior teor de aditivo superplastificante para as amostras com incorporação de microfibras resultou em uma maior fluidez do concreto e, conseqüentemente, queda da estabilidade de forma das camadas. Já no estado endurecido, algumas melhorias de desempenho foram observadas. Quanto à resistência à compressão axial, as diferentes amostras apresentaram os efeitos da anisotropia. Para a direção de carregamento perpendiculares às camadas, os resultados foram superiores aos paralelos, atingindo uma diferença máxima de 27,04%. Em relação à incorporação das microfibras, obteve-se um ganho de desempenho de 11,58% para as amostras com teores de 0,2% de microfibras de aço em relação à amostra de referência sem microfibras. Por fim, foi possível identificar um ganho de resistência da união entre as camadas na ordem de 13,64% e 18,37% para os elementos com microfibras de polipropileno e de aço, respectivamente.

**Palavras-chave:** Concreto de cimento Portland. Impressão 3D de concreto. Microfibras de aço e de polipropileno. Propriedades mecânicas e no estado fresco.



## ABSTRACT

Concrete 3D printing technology, which has increased exponentially in recent years, represents the solution to gaps, such as low productivity and high demand for labor at the construction site for the civil construction sector. However, concrete 3D printing faces some challenges to be solved. The first is related to its properties in fresh concrete, the ability of the material to pass through the equipment in a continuous flow, and its shape's stability after depositing successive layers of concrete. Second, the challenges related to its hardened state, the anisotropy of the printed concrete elements, and the union between the deposited layers. For these reasons, the present study proposes to incorporate polypropylene and steel microfibers in varying amounts to promote better performance in their fresh and hardened state. Therefore, the main objective of this work is to evaluate the performance of concrete elements produced by 3D printing with the incorporation of microfibers. The fresh concrete is analyzed on the shape stability of the layers, in which the vertical variation of the height of the layers. In the hardened state, axial compressive strength and bond strength between the layers. Regarding the fresh concrete, the incorporation of microfibers did not represent significant effects on the shape stability of the layers. The central hypothesis is that the higher content of superplasticizer additive for the samples with microfiber incorporation resulted in a greater fluidity of the concrete and, consequently, a decrease in the stability of the layers. Already in the hardened state, some performance improvements were observed. As for the axial compressive strength, the different samples showed anisotropy effects. For the perpendicular loading direction to the layers, the results were superior to the parallel ones, reaching a maximum difference of 27.04%. Regarding the incorporation of microfibers, a performance gain of 11.58% for samples with 0.2% of steel microfibers to reference samples without microfibers. Finally, it was possible to identify a gain in bond strength between the layers in the order of 13.64% and 18.37% for elements with polypropylene and steel microfibers, respectively.

**Keywords:** Portland cement concrete. 3D printed concrete. Polypropylene and steel fiber. Fresh and mechanical properties.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplo de aplicação da manufatura aditiva em grande escala: a) <i>Contour Crafting</i> ; b) <i>D-Shape</i> ; c) <i>Concrete Printing</i> . . . . .	26
Figura 2 – Requisitos do concreto como material de impressão. . . . .	29
Figura 3 – Transferência de tensões entre as fibras e a matriz. . . . .	35
Figura 4 – Fibras de polipropileno: a) fibriladas; b) monofilamento. . . . .	37
Figura 5 – Resumo das vantagens e desvantagens da incorporação de fibras na manufatura aditiva. . . . .	41
Figura 6 – Ensaio de estabilidade de cilindro. . . . .	42
Figura 7 – Métodos de teste de resistência da união entre camadas. . . . .	44
Figura 8 – Fluxograma geral do programa experimental. . . . .	48
Figura 9 – Curva granulométrica do cimento. . . . .	51
Figura 10 – Curva granulométrica da areia. . . . .	52
Figura 11 – Amostra da areia. . . . .	53
Figura 12 – Curva granulométrica do fíler calcário. . . . .	54
Figura 13 – Amostra do fíler calcário. . . . .	54
Figura 14 – Curva granulométrica da sílica ativa. . . . .	56
Figura 15 – Amostra da sílica ativa. . . . .	56
Figura 16 – Microfibra de aço. . . . .	58
Figura 17 – Misturador utilizado. . . . .	63
Figura 18 – Cura das amostras impressas. . . . .	63
Figura 19 – Equipamento utilizado para impressão. . . . .	64
Figura 20 – Dimensões do bico de extrusão do equipamento de impressão. . . . .	65
Figura 21 – Amostra obtida na impressora. . . . .	65
Figura 22 – Amostra prismática após sua extração. . . . .	65
Figura 23 – Pulverizador utilizado no procedimento de <i>spray</i> de água. . . . .	66
Figura 24 – Ensaio para determinação do índice de consistência. . . . .	67
Figura 25 – Equipamento para determinação da massa específica. . . . .	67
Figura 26 – Ilustração do teste de estabilidade de forma. . . . .	68
Figura 27 – Posicionamento da câmera para o teste de estabilidade de forma. . . . .	69
Figura 28 – Avaliação da altura das camadas com auxílio do <i>software</i> computacional de imagens ImageJ®. . . . .	69
Figura 29 – Produção e extração das amostras impressas. . . . .	71
Figura 30 – Ensaio à compressão de amostra impressa - posição horizontal. . . . .	73
Figura 31 – Ensaio à compressão de amostra impressa - posição vertical. . . . .	73
Figura 32 – Ilustração da extração e posição de ensaio das amostras impressas extraídas. . . . .	74
Figura 33 – Teste de partição de prisma. . . . .	75

Figura 34 – Ensaio de aderência intercamadas. . . . .	76
Figura 35 – Camadas após ruptura do ensaio de aderência intercamadas. . . .	76
Figura 36 – Ensaio de resistência à tração na flexão - amostra moldada. . . . .	77
Figura 37 – Ensaio de resistência à compressão axial - amostra moldada. . . . .	78
Figura 38 – Altura da primeira camada antes e após o depósito da segunda camada com suas respectivas deformações. . . . .	82
Figura 39 – Altura da primeira camada após o depósito da segunda, segunda camada e primeira mais segunda camada. . . . .	83
Figura 40 – Resistência à compressão das amostras moldadas para cada com- posição. . . . .	85
Figura 41 – Resistência à tração na flexão das amostras moldadas para cada composição. . . . .	87
Figura 42 – Amostra rompida após o ensaio de resistência à tração na flexão. . .	88
Figura 43 – Resistência à compressão das amostras impressas para as compo- sições sem aplicação de <i>spray</i> de água. . . . .	89
Figura 44 – Resistência à compressão das amostras impressas para as compo- sições com aplicação de <i>spray</i> de água. . . . .	90
Figura 45 – Resistência à tração interfacial das amostras impressas para as com- posições sem aplicação de <i>spray</i> de água. . . . .	93
Figura 46 – Resistência à tração interfacial das amostras impressas para as com- posições com aplicação de <i>spray</i> de água. . . . .	94
Figura 47 – Aspecto visual das amostras rompidas, com teor de: a) 0,1% de polipropileno; b) 0,1% de aço; c) 0,2% de aço. . . . .	96
Figura 48 – ANOVA e teste de Tukey da primeira camada antes do depósito da segunda para todos os traços. . . . .	109
Figura 49 – ANOVA e teste de Tukey da primeira camada após do depósito da segunda para todos os traços. . . . .	110
Figura 50 – ANOVA e teste de Tukey da segunda camada para todos os traços.	110
Figura 51 – ANOVA e teste de Tukey da primeira com a segunda camada para todos os traços. . . . .	111
Figura 52 – ANOVA e teste de Tukey da resistência à compressão axial das amostras moldadas. . . . .	112
Figura 53 – ANOVA e teste de Tukey da resistência à tração na flexão das amos- tras moldadas. . . . .	113
Figura 54 – ANOVA e teste de Tukey da resistência à compressão das amostras impressas com a direção de carregamento do tipo 1. . . . .	114
Figura 55 – ANOVA e teste de Tukey da resistência à compressão das amostras impressas com a direção de carregamento do tipo 2. . . . .	114

Figura 56 – ANOVA e teste de Tukey da resistência à interfacial das amostras  
impressas. . . . . 115

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Características gerais das diferentes categorias da manufatura aditiva.	27
Quadro 2 – Materiais e proporções mais utilizadas. . . . .	59
Quadro 3 – Resumo do número de amostras impressas para os ensaios no estado endurecido. . . . .	72
Quadro 4 – Resumo do número de amostras moldadas para os ensaios no estado endurecido. . . . .	77
Quadro 5 – Resumo do programa experimental. . . . .	79

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades típicas das fibras. . . . .	36
Tabela 2 – Características físicas do cimento CP V-ARI. . . . .	49
Tabela 3 – Características químicas do cimento CP V-ARI. . . . .	50
Tabela 4 – Distribuição granulométrica do cimento. . . . .	50
Tabela 5 – Distribuição granulométrica da areia. . . . .	52
Tabela 6 – Distribuição granulométrica do fíler calcário. . . . .	53
Tabela 7 – Características físicas e químicas da sílica. . . . .	55
Tabela 8 – Distribuição granulométrica da sílica ativa. . . . .	55
Tabela 9 – Características físicas e químicas do aditivo MC-PowerFlow 4001. . . . .	57
Tabela 10 – Características físicas da microfibras de polipropileno. . . . .	57
Tabela 11 – Características da microfibras de aço. . . . .	58
Tabela 12 – Composição de referência. . . . .	59
Tabela 13 – Composição padrão sem fibras. . . . .	60
Tabela 14 – Teores das fibras utilizadas. . . . .	61
Tabela 15 – Composição unitária em massa para cada teor de fibras. . . . .	62
Tabela 16 – Caracterização das composições no estado fresco. . . . .	80
Tabela 17 – Altura da primeira camada antes e após o depósito da segunda camada. . . . .	81
Tabela 18 – Altura da primeira camada após o depósito da segunda, segunda camada e primeira mais segunda camada. . . . .	83
Tabela 19 – Relação entre deformação da primeira camada e índice de consis- tência. . . . .	84
Tabela 20 – Resultado de resistência à compressão das amostras moldadas para cada composição. . . . .	85
Tabela 21 – Resultado de resistência à tração na flexão das amostras moldadas para cada composição. . . . .	86
Tabela 22 – Resultado da resistência à compressão das amostras impressas - Tipo 1. . . . .	88
Tabela 23 – Resultado da resistência à compressão das amostras impressas - Tipo 2. . . . .	89
Tabela 24 – Diferença da resistência à compressão entre a posição do tipo 1 e 2. . . . .	90
Tabela 25 – Diferença da resistência à compressão entre amostras sem e com aplicação de <i>spray</i> . . . . .	91
Tabela 26 – Diferença da resistência à compressão das amostras sem aplicação de <i>spray</i> em relação à amostra de referência. . . . .	91
Tabela 27 – Diferença da resistência à compressão das amostras com aplicação de <i>spray</i> em relação à amostra de referência. . . . .	91

Tabela 28 – Resultado da resistência à tração interfacial. . . . .	93
Tabela 29 – Diferença da resistência à tração interfacial das amostras sem e com aplicação de <i>spray</i> de água. . . . .	94
Tabela 30 – Diferença da resistência à tração interfacial das amostras com incorporação de microfibras em relação com a de referência. . . . .	95

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

2D	Bidimensional
3D	Tridimensional
ANOVA	Análise da Variância
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BIM	<i>Building information modeling</i>
CAD	<i>Computer aided design</i>
CASAN	Companhia Catarinense de Águas e Saneamento
CP V-ARI	Cimento Portland de alta resistência inicial
CRF	Concreto reforçado com fibras
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LMCC	Laboratório de materiais de construção civil
NANOTEC	Laboratório de aplicações de nanotecnologia em construção civil
NBR	Norma Brasileira
NM	Norma Mercosul
PCA	<i>Portland Cement Association</i>
pH	Potencial hidrogeniônico
PPGEC	Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil
PVA	Álcool polivinílico
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina



## LISTA DE SÍMBOLOS

$t_{h,min}$	Tempo mínimo da janela de impressão
$\rho$	Densidade
$g$	Gravidade
$h$	Altura da camada
$A_{thix}$	Taxa de estruturação
$t_{h,max}$	Tempo máximo da janela de impressão
$\mu_p$	Viscosidade plástica
$V$	Velocidade
$\tau_{0,t}$	Tensão de escoamento após t segundos
$\tau_{00}$	Tensão de escoamento inicial
$t$	Tempo
$rpm$	Rotações por minuto
$R_c$	Resistência à compressão
$F_c$	Carga máxima aplicada no ensaio de compressão axial
$F_t$	Resistência à tração interfacial
$P_u$	Carga máxima aplicada no ensaio de punção
$A$	Área de interface do ensaio de punção
$R_f$	Resistência à tração na flexão
$F_f$	Carga máxima aplicada verticalmente no centro do prisma no ensaio à tração na flexão
$L$	Distância entre os suportes no ensaio à tração na flexão

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>20</b>
1.1	OBJETIVOS	23
<b>1.1.1</b>	<b>Objetivo Geral</b>	<b>23</b>
<b>1.1.2</b>	<b>Objetivos Específicos</b>	<b>23</b>
1.2	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	23
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>25</b>
2.1	MANUFATURA ADITIVA APLICADA À CONSTRUÇÃO CIVIL	25
<b>2.1.1</b>	<b>Conceito geral</b>	<b>25</b>
<b>2.1.2</b>	<b>Impressão 3D na construção civil</b>	<b>25</b>
<b>2.1.3</b>	<b>ISO/ASTM 52900</b>	<b>27</b>
<b>2.1.4</b>	<b>Vantagens e limitações da manufatura aditiva na construção civil</b>	<b>28</b>
<b>2.1.5</b>	<b>O concreto como material de impressão</b>	<b>29</b>
2.1.5.1	Capacidade de impressão	30
2.1.5.2	Desempenho no estado endurecido	32
2.2	CONSIDERAÇÕES SOBRE CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS	33
<b>2.2.1</b>	<b>Introdução</b>	<b>33</b>
<b>2.2.2</b>	<b>As fibras e seus efeitos nas propriedades do concreto</b>	<b>33</b>
2.2.2.1	Efeito da incorporação das fibras sobre as propriedades do concreto	34
2.2.2.1.1	<i>Efeito no estado fresco</i>	34
2.2.2.1.2	<i>Efeito no estado endurecido</i>	34
2.2.2.2	Tipos de fibras	35
2.2.2.2.1	<i>Microfibras de polipropileno</i>	36
2.2.2.2.2	<i>Microfibras de aço</i>	37
2.3	CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS COMO MATERIAL DE IMPRESSÃO	37
<b>2.3.1</b>	<b>Introdução</b>	<b>38</b>
<b>2.3.2</b>	<b>Justificativas do uso das fibras no concreto de manufatura aditiva</b>	<b>38</b>
<b>2.3.3</b>	<b>Vantagens da incorporação das fibras no concreto de impressão 3D</b>	<b>39</b>
2.3.3.1	Vantagens no estado fresco	39
2.3.3.2	Vantagens no estado endurecido	39
<b>2.3.4</b>	<b>Desvantagens da incorporação das fibras no concreto de impressão 3D</b>	<b>39</b>
2.3.4.1	Desvantagens no estado fresco	39
2.3.4.2	Desvantagens no estado endurecido	40
<b>2.3.5</b>	<b>Avaliação das peças de concreto de manufatura aditiva reforçado com fibras</b>	<b>41</b>

2.3.5.1	Ensaio no estado fresco . . . . .	41
2.3.5.2	Ensaio no estado endurecido . . . . .	43
2.3.5.2.1	<i>Resistência à compressão</i> . . . . .	43
2.3.5.2.2	<i>Aderência entre as camadas</i> . . . . .	44
2.4	SÍNTESE DA FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA . . . . .	45
<b>3</b>	<b>PROGRAMA EXPERIMENTAL</b> . . . . .	<b>47</b>
3.1	ESTUDOS PRELIMINARES . . . . .	49
<b>3.1.1</b>	<b>Caracterização dos materiais</b> . . . . .	<b>49</b>
3.1.1.1	Cimento Portland . . . . .	49
3.1.1.2	Areia . . . . .	51
3.1.1.3	Fíler calcário . . . . .	53
3.1.1.4	Sílica ativa . . . . .	54
3.1.1.5	Aditivo superplastificante . . . . .	56
3.1.1.6	Microfibras de polipropileno . . . . .	57
3.1.1.7	Microfibras de aço . . . . .	57
3.1.1.8	Água . . . . .	58
<b>3.1.2</b>	<b>Elaboração da composição do concreto com fibras para impressão 3D</b> . . . . .	<b>58</b>
3.1.2.1	Composição de referência . . . . .	58
3.1.2.1.1	<i>Revisão sistemática de literatura</i> . . . . .	59
3.1.2.1.2	<i>Testes preliminares de impressibilidade</i> . . . . .	59
3.1.2.2	Elaboração de novas composições . . . . .	60
3.1.2.2.1	<i>Ajustes da composição de referência</i> . . . . .	60
3.1.2.2.2	<i>Adição das fibras na composição padrão</i> . . . . .	60
3.2	PRODUÇÃO E ENSAIOS . . . . .	62
<b>3.2.1</b>	<b>Procedimentos de mistura</b> . . . . .	<b>62</b>
<b>3.2.2</b>	<b>Procedimentos de cura</b> . . . . .	<b>63</b>
<b>3.2.3</b>	<b>Procedimentos de impressão e extração dos corpos de prova</b> . . . . .	<b>64</b>
<b>3.2.4</b>	<b>Procedimento para a melhoria da união entre as camadas</b> . . . . .	<b>66</b>
3.2.4.1	Aplicação de <i>spray</i> de água na superfície das camadas . . . . .	66
<b>3.2.5</b>	<b>Ensaio no estado fresco</b> . . . . .	<b>67</b>
3.2.5.1	Índice de consistência e massa específica . . . . .	67
3.2.5.2	Avaliação da construtibilidade . . . . .	67
3.2.5.2.1	<i>Teste de estabilidade de forma das camadas</i> . . . . .	68
<b>3.2.6</b>	<b>Ensaio no estado endurecido</b> . . . . .	<b>70</b>
3.2.6.1	Amostras impressas produzidas para o programa experimental . . . . .	70
3.2.6.2	Resistência à compressão das amostras impressas . . . . .	72
3.2.6.3	Aderência intercamadas . . . . .	74
3.2.6.4	Resistência à compressão e à tração na flexão das amostras moldadas . . . . .	76

3.2.6.4.1	<i>Resistência à tração na flexão para as amostras moldadas . . . . .</i>	77
3.2.6.4.2	<i>Resistência à compressão axial para as amostras moldadas . . . . .</i>	78
<b>3.2.7</b>	<b>Resumo do programa experimental . . . . .</b>	<b>78</b>
3.2.7.1	Nomenclaturas . . . . .	79
<b>4</b>	<b>APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS . . . . .</b>	<b>80</b>
4.1	ESTADO FRESCO . . . . .	80
<b>4.1.1</b>	<b>Determinação do índice de consistência e massa específica . . .</b>	<b>80</b>
<b>4.1.2</b>	<b>Teste de estabilidade de forma das camadas . . . . .</b>	<b>81</b>
4.2	ESTADO ENDURECIDO . . . . .	85
<b>4.2.1</b>	<b>Amostras moldadas . . . . .</b>	<b>85</b>
4.2.1.1	Resistência à compressão axial . . . . .	85
4.2.1.2	Resistência à tração na flexão . . . . .	86
<b>4.2.2</b>	<b>Amostras impressas . . . . .</b>	<b>88</b>
4.2.2.1	Resistência à compressão axial . . . . .	88
4.2.2.2	Aderência entre camadas . . . . .	92
4.3	ANÁLISE GERAL . . . . .	96
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO . . . . .</b>	<b>97</b>
5.1	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS . . . . .	98
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>100</b>
	<b>APÊNDICE A – TESTE DE ESTABILIDADE DE FORMA DAS CA-</b>	
	<b>MADAS . . . . .</b>	<b>109</b>
	<b>APÊNDICE B – AMOSTRAS MOLDADAS . . . . .</b>	<b>112</b>
	<b>APÊNDICE C – AMOSTRAS IMPRESSAS . . . . .</b>	<b>114</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A construção civil é um dos setores mais importantes da economia mundial. Durante as próximas décadas, ela será responsável pelo desenvolvimento socioeconômico das principais economias emergentes que concentrarão a maior parte do crescimento da população global. Nations (2019) indica que ocorrerá um aumento de 7,7 bilhões para 9,7 bilhões de pessoas até 2050.

Diante do amplo crescimento da população mundial, é fundamental o desenvolvimento de processos que reduzam o consumo de matérias primas e que desenvolvam uma maior produtividade dentro do canteiro de obras. No entanto, uma das maiores dificuldades encontrada pela indústria da construção é a baixa produtividade e uma demanda mundial crescente por infraestrutura. O crescimento da produtividade na construção civil foi em média de 1% ao longo de duas décadas, já o crescimento da economia mundial no mesmo período foi de 2,8% (BARBOSA; WOETZEL; MISCHKE, 2017).

Nos últimos anos o desenvolvimento tecnológico de novos processos para a construção civil ganhou destaque, dentro delas a impressão 3D de concreto que apresentou um aumento expressivo de publicações. Esse aumento ocorre devido ao interesse da indústria em desenvolver novos procedimentos que reduzam custos e promovam um menor impacto ambiental com a diminuição do consumo de insumos. O processo de impressão 3D contribui muito bem nestes dois pontos, reduzindo a quantidade de mão de obra pesada presente no canteiro de obra, além de eliminar a necessidade da utilização de fôrma para o concreto, aumentando a liberdade geométrica e arquitetônica das construções (LE *et al.*, 2012b; PANDA; PAUL; TAN, 2017; BUSWELL *et al.*, 2018; YE *et al.*, 2021).

Entretanto, para que a tecnologia de manufatura aditiva de concreto seja utilizada em larga escala para a substituição total ou parcial de métodos convencionais de construção, são necessários alguns avanços. Atualmente, mais da metade dos processos de impressão de concreto são baseados pelo método por extrusão. Esse processo consiste no bombeamento e no lançamento de filamentos contínuos através de um bocal, este bocal pode estar montado em um pórtico ou em um braço robótico em que os filamentos podem ser depositados em sucessivas camadas formando assim o elemento projetado (BUSWELL *et al.*, 2018).

No processo de extrusão de concreto alguns desafios são encontrados, primeiramente o concreto deve apresentar fluidez suficiente para passar pela extrusora e pelo bocal sem causar entupimento do equipamento; essa característica é denominada de "extrudabilidade" (LE *et al.*, 2012b). Após a sua passagem no equipamento, os filamentos de concreto devem apresentar um aumento da tensão de escoamento para suportar o seu peso próprio e das camadas subsequentes, sem colapsar e com uma

pequena margem de deformação. Portanto, o ganho de tensão de escoamento deve ser maior do que o ganho de tensões originadas pelas novas camadas depositadas, essa capacidade de suportar o seu peso próprio bem como das camadas seguintes é denominado de "construtibilidade" (HOU *et al.*, 2021). Outro ponto importante é na manutenção da fluidez do material durante a impressão, já que a boa aderência entre uma camada e outra depende do seu desenvolvimento microestrutural.

Além dos critérios relacionados à extrudabilidade e à construtibilidade do material, um importante desafio é na aplicação de reforços durante o processo de impressão. Para o concreto estrutural, comumente utilizado na indústria da construção civil, já é preconizado há décadas a aplicação da armadura antes da concretagem para a obtenção de elementos estruturais mistos. No entanto, as técnicas convencionais de reforços são incompatíveis com a manufatura aditiva ou anulam amplamente os seus potenciais benefícios, já que necessitam da aplicação de novos processos que diminuem a velocidade de produção dos elementos impressos (BOS; BOSCO; SALET, 2019).

Uma estratégia utilizada na bibliografia para atender a demanda estrutural de elementos de concreto produzidos por impressão 3D é a incorporação de fibras. Nos últimos anos, ocorreu um amplo aumento de publicações relacionadas à adição de fibras na manufatura aditiva, já que elas oferecem uma solução atraente no aumento a resistência à compressão e à flexão, na tenacidade, na integridade das peças produzidas por impressão 3D, além da redução da fissuração por retração plástica (LI, L. *et al.*, 2021; BOS; BOSCO; SALET, 2019).

As principais vantagens encontradas em trabalhos que incorporaram fibras em peças de concreto de manufatura aditiva estão relacionadas principalmente à melhoria em seu desempenho mecânico. Arunothayan *et al.* (2020) investigaram elementos de concreto com 2% de teor em volume de fibras de aço, em seus resultados foram obtidos ganhos de resistência à compressão e à flexão em relação aos elementos de referência sem fibras. Le *et al.* (2012a) verificaram uma redução na fissuração por retração plástica com a adição de fibras de polipropileno em peças de concreto impressos em 3D, porém as propriedades mecânicas e a ductilidade não tiveram uma melhoria expressiva.

Outros trabalhos obtiveram uma melhoria no desempenho mecânico em elementos de concreto de manufatura aditiva com a incorporação de diferentes tipos de fibras, entre elas: microfibras de aço, polipropileno, álcool polivinílico (PVA), vidro e basalto (LE *et al.*, 2012a; PANDA; PAUL; TAN, 2017; NEMATOLLAHI *et al.*, 2018a, 2018b; ARUNOTHAYAN *et al.*, 2020; SCHULTE *et al.*, 2021).

Em relação ao seu estado fresco, a utilização das fibras no concreto de impressão 3D apresentou alguns benefícios. Nematollahi *et al.* (2018a) obtiveram um ganho na capacidade de retenção de forma proporcional ao aumento do teor de microfibras de polipropileno. Schulte *et al.* (2021) observaram um acréscimo significativo na tensão

de escoamento estática com o aumento do teores de fibras de PVA.

Em contraponto às inúmeras vantagens que a adição de fibras pode promover na manufatura aditiva, alguns desafios são observados na bibliografia. Primeiramente, a diminuição da extrudabilidade e a dificuldade da aplicação de teores maiores que 1% de volume de fibras que podem causar o entupimento do bico da extrusora (LI *et al.*, 2020). Segundo pela possível diminuição da aderência entre as camadas de concreto produzidos por manufatura aditiva (NEMATOLLAHI *et al.*, 2018a).

Para Nematollahi *et al.* (2018a), a diminuição de resistência de união entre as camadas ocorre devido à menor capacidade dos filamentos recém colocados de deformarem, impedindo a formação de uma interface com uma boa aderência. O principal fator é a maior adsorção de água pelas fibras que afeta a umidade superficial das camadas. Para que a ligação entre as camadas se desenvolva é necessário que superfície apresente um certo grau de umidade, em superfícies secas essa ligação não é desenvolvida (SANJAYAN *et al.*, 2018).

Visto que os principais problemas proporcionados pela adição de fibras na manufatura aditiva estão relacionados ao seu estado fresco, os futuros estudos devem ser direcionados na análise desses desafios. No entanto, são poucos os trabalhos que investigaram a relação de desempenho da adição de fibras no estado fresco (SCHULTE *et al.*, 2021). Para a realização dessa avaliação é necessário a utilização de métodos qualitativos e quantitativos que avaliem a extrudabilidade e a capacidade de retenção de forma do material (construtibilidade).

Alguns ensaios que avaliam a estabilidade de forma do concreto de impressão 3D foram apresentados por outras bibliografias. Nematollahi *et al.* (2018a) utilizaram o cone de mini-slump para simular a capacidade de retenção de forma das camadas subsequentes. Kazemian *et al.* (2017) realizaram a impressão de duas camadas, uma sobreposta a outra, em que uma câmera posicionada na frente do corpo de prova captava a deformação. Schulte *et al.* (2021) exploraram as propriedades reológicas do concreto de impressão 3D com fibras de PVA, analisando a tensão de escoamento estática e dinâmica, a viscosidade e a tixotropia do compósito.

Como observado anteriormente, os trabalhos desenvolvidos relacionados ao uso e a avaliação da fibras na impressão 3D são recentes e apresentam como principal foco a avaliação dos elementos em seu estado endurecido. Alguns poucos estudos estão relacionados com a análise das propriedades no estado fresco, como os ensaios que avaliam a construtibilidade.

Com a incorporação das fibras é esperado uma melhoria na estabilidade de forma das camadas, possibilitando intervalos de impressões menores. Todavia, são necessários métodos que avaliem a construtibilidade com diferentes fibras em teores variados, além de procedimentos que promovam uma melhoria na extrudabilidade e na aderência entre as camadas. Desta forma, este trabalho propõe desenvolver

um método de avaliação da estabilidade de forma (construtibilidade) do concreto de impressão 3D, além da adoção de processos que melhorem a aderência entre as camadas.

Os processos adotados são a aplicação de borrifamento de água na superfície das camadas e a incorporação de microfibras de polipropileno e de aço em diferentes teores. Esses novos procedimentos são avaliados no estado fresco pelo ensaio de estabilidade de forma e no estado endurecido pela resistência à compressão e aderência entre as camadas.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo do presente trabalho é avaliar o desempenho nos estados fresco e endurecido de peças de concreto produzidas por impressão 3D com a incorporação de fibras de polipropileno e de aço em teores variados.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- Desenvolver e aplicar um método de análise de imagens para a avaliação da estabilidade de forma no estado fresco de concretos produzidos por impressão 3D;
- Avaliar o desempenho da aderência intercamadas e desenvolver um novo procedimento para a sua melhoria;
- Analisar as propriedades mecânicas de peças de concreto com fibras produzidos por impressão 3D: aderência intercamadas e resistência à compressão axial.

## 1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O presente estudo foi desenvolvido em conjunto com o Grupo de Pesquisa de Impressão 3D pertencente ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - PPGEC da Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC. Os procedimentos experimentais foram realizados no Laboratório de Aplicações de Nanotecnologia em Construção Civil - NANOTEC e no Laboratório de Materiais da Construção Civil - LMCC localizados no Bloco de Engenharia Civil da UFSC.

Este documento foi estruturado em cinco capítulos, além das referências bibliográfica e anexos, conforme descrito abaixo.

O capítulo 1 é composto por uma breve introdução sobre o desenvolvimento da impressão 3D de concreto na construção civil, em que apresenta: um contexto geral, o que já se sabe na bibliografia existente, a justificativa em se utilizar fibras na impressão



3D de concreto, as vantagens e desvantagens em se utilizar as fibras e as soluções para as lacunas existentes. Em seguida, são expostos os objetivos gerais e específicos e a estrutura dessa dissertação.

No capítulo 2 é abordada a fundamentação teórica, apresentando-se a bibliografia sobre a impressão 3D de concreto, com ênfase nos conceitos gerais, na ISO/ASTM 52900 (ABNT, 2018), em alguns exemplos de aplicações, nas vantagens e limitações, nas possíveis soluções e na revisão da bibliografia do concreto como material de impressão. Na segunda etapa da fundamentação teórica conceitos importantes sobre o concreto com fibras (CRF), os tipos de fibras e os seus efeitos nas propriedades do concreto. Por último, são abordados os conceitos da incorporação de fibras na manufatura aditiva de concreto, com: as justificativas de seu uso, as suas vantagens e desvantagens e os métodos existentes para avaliar as suas propriedades.

No capítulo 3 é apresentada uma descrição geral do programa experimental do trabalho desenvolvido, a fim de alcançar os objetivos propostos, iniciando com os estudos preliminares que contem a caracterização dos materiais e a elaboração das composições. A produção e ensaios realizados, que abrange: os procedimentos de mistura, de impressão e de cura, a descrição de um novo processo para a melhoria da união entre as camadas e os ensaios adotados para avaliar as propriedades no estado fresco e endurecido.

No capítulo 4 são apresentados e discutidos os resultados obtidos no programa experimental.

O capítulo 5 contem as considerações finais da pesquisa, as principais conclusões alcançadas e os aspectos a serem explorados em pesquisas futuras.

Por fim, são apresentadas as referências bibliográficas e os apêndices que contribuem para um melhor entendimento dos resultados encontrados.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo será explorada a bibliografia existente sobre a impressão 3D de concreto, do concreto reforçado com fibras (CRF) e da incorporação de fibras na manufatura aditiva de concreto.

### 2.1 MANUFATURA ADITIVA APLICADA À CONSTRUÇÃO CIVIL

Nesta seção serão apresentados: os conceitos gerais sobre a manufatura aditiva aplicada na construção civil, a ISO/ASTM 52900 (ABNT, 2018) e alguns exemplos de aplicações. Além das vantagens e limitações, as possíveis soluções e uma revisão da bibliografia do concreto como material de impressão.

#### 2.1.1 Conceito geral

A manufatura aditiva, também conhecida na literatura como impressão 3D, é a técnica de fabricação de objetos a partir do depósito de sucessivas camadas de materiais, com base em um modelo previamente estabelecido.

Alguns setores da indústria vem explorando a manufatura aditiva para otimizar as suas linhas de produção, sendo o setor: aeroespacial, automotivo, de saúde e da construção civil, os que mais exploram (CAMACHO *et al.*, 2017).

Diferentemente de outros setores, como no automotivo e médico, na construção civil a implementação da manufatura aditiva ainda está na fase inicial. O *Building Information Modeling* (BIM) em substituição do processo clássico 2D por *Computer Aided Design* (CAD), vem contribuindo para o desenvolvimento de modelagens de projetos totalmente parametrizados. A implementação do BIM na construção civil é uma etapa importante para a geração de dados essenciais para a implementação da manufatura aditiva (KAZEMIAN *et al.*, 2017; CAMACHO *et al.*, 2017).

No entanto, por ainda estar em sua fase inicial, a maioria dos estudos a respeito da aplicação da impressão 3D na construção civil apresenta como enfoque a capacidade de impressão e o desempenho dos elementos produzidos.

#### 2.1.2 Impressão 3D na construção civil

O primeiro trabalho de manufatura aditiva na construção foi desenvolvido por Behrokh Khoshnevis na década de 1990 (KHOSHNEVIS, 2004). A partir da tecnologia denominada de *Contour Crafting* composto por um sistema de pórtico móvel, Khoshnevis (2004) conseguiu depositar o material de impressão nos lugares desejados, sem a utilização de forma ou de mão de obra.

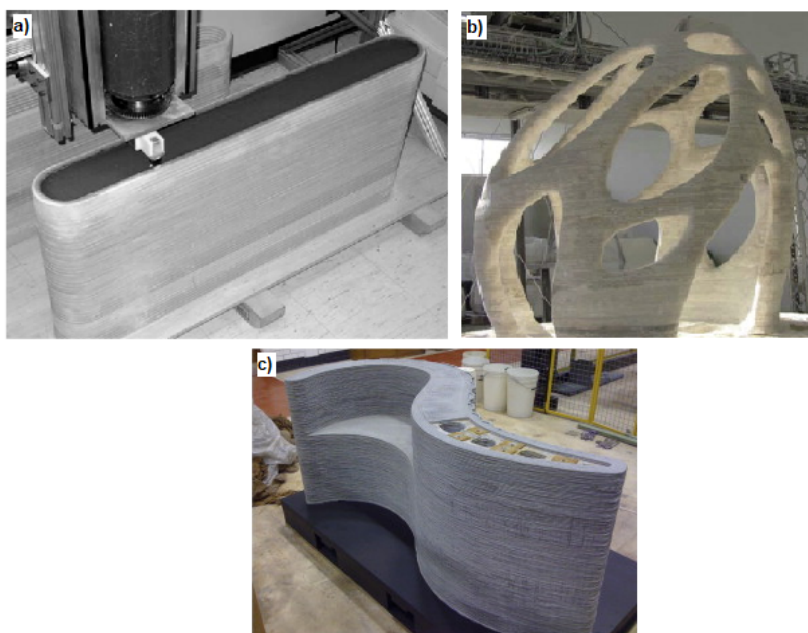
Após o trabalho pioneiro de Khoshnevis (2004), outros métodos de manufatura aditiva foram desenvolvidos. No entanto, atualmente, a técnica de impressão 3D de

concreto mais popular é a por extrusão. Esse método é baseado na deposição de um filamento contínuo pelo bico da extrusora em sucessivas camadas (MOHAN *et al.*, 2021). O primeiro trabalho publicado sobre impressão 3D de concreto por extrusão foi desenvolvido na Universidade de Loughborough no final da década de 2000 (LIM *et al.*, 2012). A partir do ano de 2010, inúmeros trabalhos com o uso da extrusão como processo de manufatura aditiva na construção foram desenvolvidos (KAZEMIAN *et al.*, 2017; PANDA; PAUL; TAN, 2017; BUSWELL *et al.*, 2018; RUBIN, 2021; RUBIN; HASSE; REPETTE, 2021).

Atualmente, a manufatura aditiva na construção civil apresenta três processos mais utilizados: *Contour Crafting*, *D-Shape* e *Concrete Printing* (KHOSHNEVIS, 2004; LIM *et al.*, 2012). Todos os processos demonstram sucesso em suas aplicações, apresentam características semelhantes, contudo, finalidades diferentes.

O processo por *D-Shape* utiliza a deposição de pó, que é endurecido após a passagem de um aglutinante. Já o *Contour Crafting*, é o processo pioneiro, baseado na extrusão de pasta à base de cimento. Após a o lançamento da pasta, uma espátula realiza o acabamento da superfície das camadas. No *Concrete Printing* também é utilizado o processo de extrusão de argamassa ou concreto, porém, não é utilizada a espátula. Uma de suas características é o maior controle das geometrias internas e externas (LIM *et al.*, 2012). Na Figura 1 são apresentadas aplicações bem sucedidas da impressão 3D de concreto para cada um dos três processos.

Figura 1 – Exemplo de aplicação da manufatura aditiva em grande escala: a) *Contour Crafting*; b) *D-Shape*; c) *Concrete Printing*.



Fonte: Khoshnevis *et al.* (2006) e Lim *et al.* (2012).

### 2.1.3 ISO/ASTM 52900

A ISO/ASTM 52900 (ABNT, 2018) define a tecnologia de manufatura aditiva<sup>1</sup> (*additive manufacturing*). A partir de um modelo geométrico 3D, sucessivas camadas são depositadas para formarem o material projetado.

De acordo com a ISO/ASTM 52900 (ABNT, 2018) existem sete diferentes categorias de processos de manufatura aditiva, cada processo apresenta características técnicas distintas, sendo: jato de aglutinante (*binder jetting*), deposição por energia direcionada (*direct energy deposition*), extrusão de material<sup>2</sup> (*material extrusion*), jateamento de material (*material jetting*), fusão em leito de pó (*powder bed fusion*), laminação de folha (*sheet lamination*) e fotopolimerização em cuba (*vat photopolymerization*). No Quadro 1 são apresentadas as características gerais das diferentes categorias de manufatura aditiva.

Quadro 1 – Características gerais das diferentes categorias da manufatura aditiva.

<b>Categorias de processos da manufatura aditiva</b>	
<b>Processo</b>	<b>Característica</b>
Jato de aglutinante	Um agente de ligação de líquido é depositado seletivamente para unir materiais em pó
Deposição por energia direcionada	A energia térmica focada é usada para unir materiais por fusão, à medida que estão sendo depositados
Extrusão de material	O material é depositado seletivamente por meio de um bico extrusor ou orifício
Jateamento de material	Gotas de material de fabricação são depositadas seletivamente
Fusão em leito de pó	A energia térmica funde seletivamente regiões do leito de pó
Laminação de folha	Folhas de material são ligadas para formar uma peça
Fotopolimerização em cuba	Fotopolímero líquido em uma cuba é curado seletivamente por polimerização ativada por luz

Fonte: ISO/ASTM 52900 (ABNT, 2018).

<sup>1</sup> Segundo a ISO/ASTM 52900 (ABNT, 2018) durante o desenvolvimento da tecnologia de manufatura aditiva, houve o surgimento de inúmeros termos e definições, na maioria das vezes relacionadas as aplicações específicas e marcas registradas. Entre os termos utilizados para denominar manufatura aditiva: processos aditivos, técnicas aditivas, fabricação por camadas, dentre outros.

<sup>2</sup> No Brasil, a nomenclatura mais usada é "deposição de material fundido".

#### 2.1.4 Vantagens e limitações da manufatura aditiva na construção civil

Existem inúmeras vantagens na utilização da manufatura aditiva na construção civil. Primeiramente, o custo de impressão de elementos de concreto pode ser menor em relação aos métodos tradicionais, devido ao menor tempo necessário para conclusão e o menor desperdício de materiais (SOUZA *et al.*, 2020). Segundo, pelas questões ambientais e pelo aumento da demanda por infraestrutura e moradia nos países emergentes.

Para Kothman e Faber (2016), quando a impressão 3D de concreto atingir a maturidade tecnológica, adicionará possibilidades únicas e inéditas, revolucionando o mercado da construção como um todo, com: construções mais rápidas e baratas, liberdade geométricas que atendem a individualização e a funcionalidade, além de proporcionar uma maior sustentabilidade na construção.

Por outro lado, a impressão 3D de concreto necessita de um longo período para o seu desenvolvimento e maturidade na indústria. Na fase atual, grande parte das pesquisas existentes são voltadas na otimização das propriedades no estado fresco, já que o concreto tradicionalmente utilizado não atende aos requisitos reológicos para uso nas impressoras (SOUZA *et al.*, 2020). A substituição dos agregados graúdos por materiais finos, como: areia, cinza volante e sílica ativa, é uma das alternativas para a imprimibilidade do concreto. No entanto, a ausência de agregado graúdo nas misturas, provoca o aumento da retração e das fissurações. Uma das alternativas encontradas na bibliografia é a utilização de fibras e aditivos (YIN, H. *et al.*, 2018).

Para Zareiyan e Khoshnevis (2017), a formação de juntas frias durante o processo de impressão é um dos maiores desafios para a aplicação prática desta tecnologia. Nessas regiões podem estar localizadas falhas, que comprometem o desempenho mecânico da peça.

Uma outra limitação técnica da manufatura aditiva de concreto é na incorporação de reforços de aço na estrutura. Alguns trabalhos exploraram a utilização de fibras para a substituição total ou parcial de telas e barras metálicas nas estruturas de concreto. Na impressão 3D, algumas publicações investigaram a utilização de fibras para suprir as demandas do material em seu estado endurecido (PANDA; PAUL; TAN, 2017; NEMATOLLAHI *et al.*, 2018a, 2018b; ARUNOTHAYAN *et al.*, 2020; SCHULTE *et al.*, 2021).

Diante do estado atual do desenvolvimento do concreto de impressão 3D, as maiores dificuldades encontradas em sua produção são no estado fresco. Os concretos utilizados nesta aplicação deve ser bombeados e extrudados sem segregação. Após a sua passagem pelo bico da extrusora devem manter a sua coesão e apresentar estabilidade de forma (RUBIN; HASSE; REPETTE, 2021). Uma das possíveis alternativas para melhoraria de seu desempenho no estado fresco e endurecido é com a utilização de fibras.

### 2.1.5 O concreto como material de impressão

O concreto para impressão deve apresentar alguns requisitos no estado fresco, principalmente relacionados ao seu comportamento reológico. O concreto deve ser fluido o suficiente para passar pela extrusora, porém após a sua passagem, precisa ser firme o bastante para receber novas camadas com uma boa retenção de forma (WANGLER *et al.*, 2016).

Para Kazemian *et al.* (2017), com base em uma revisão de projetos e trabalhos de pesquisa, a utilização do cimento Portland como aglomerante é a opção mais viável para uso em processos de construções automatizada. As principais razões, são: as suas propriedades no estado fresco e endurecido que atendem aos requisitos para esta aplicação, a grande quantidade de aditivos e adições para a adaptação no processo de impressão e principalmente em relação as suas propriedades mecânicas.

Algumas etapas devem ser atendidas para o uso do concreto na impressão 3D. Para Hou *et al.* (2021) os requisitos de desempenho podem ser divididos em: capacidade de impressão que inclui a extrudabilidade e a construtibilidade, e os requisitos relacionados ao desempenho no estado endurecido que inclui a aderência intercamadas, o desempenho mecânico e a durabilidade. Na Figura 2 são apresentados os requisitos de desempenho do concreto de impressão 3D durante o processo de impressão e no estado endurecido.



Figura 2 – Requisitos do concreto como material de impressão.

Fonte: Autor, 2021.

### 2.1.5.1 Capacidade de impressão

A capacidade de impressão é um indicador do comportamento do concreto de impressão 3D em seu estado fresco. Algumas classificações são utilizadas na bibliografia. Para Panda *et al.* (2019), a capacidade de impressão é a avaliação das deformações das camadas de concreto impressos, denominada de construtibilidade. Nerella e Mechtcherine (2019) definiram a capacidade de impressão como a combinação do bombeamento, da extrudabilidade e da construtibilidade. Para Hou *et al.* (2021), a capacidade de impressão é a propriedade do concreto fresco de ser extrudado continuamente (extrudabilidade), com deformações aceitáveis antes do seu endurecimento (construtibilidade).

A seguir ambos os termos são definidos:

- **Extrudabilidade:** Após a produção do concreto, os materiais cimentícios alimentam a extrusora. Esse material é empurrado para a saída do bico da extrusora para a formação do filamento. A extrudabilidade é a capacidade de transportar o concreto fresco até o bico da extrusora em fluxo contínuo (HOU *et al.*, 2021).
- **Construtibilidade:** A construtibilidade é usada para avaliar a capacidade do concreto fresco de suportar o seu peso próprio, bem como das camadas subsequentes, sem colapso durante a impressão com uma baixa deformação. Para isso, a tensão de cisalhamento causada pela gravidade deve ser menor do que a tensão de escoamento dos materiais para a retenção de sua forma (HOU *et al.*, 2021).

O depósito sucessivo das camadas provoca o aumento das tensões induzidas pela gravidade. Para evitar o colapso, os materiais de impressão devem estar dentro de uma janela de tempo, de acordo com o aumento de sua tensão de escoamento. Essa janela de tempo é denominada na literatura de janela de impressão. Um dos maiores desafios na impressão 3D de concreto é que o material depositado apresente uma boa retenção de forma (construtibilidade), dentro de uma janela de impressão que evite a formação de juntas frias.

Portanto existem dois limites críticos, o tempo mínimo para que o concreto não apresente grandes deformações, suportando as camadas subsequentes. O tempo máximo relacionado à formação das juntas frias entre as camadas (WANGLER *et al.*, 2016).

Wangler *et al.* (2016) determinaram importantes parâmetros para a obtenção da janela de impressão. Na Equação (1) é apresentado o tempo mínimo para a produção de uma camada ( $t_{h,min}$ ).

$$t_{h,min} = \frac{\rho gh}{(\sqrt{3}A_{thix})} \quad (1)$$

Em que,

- $\rho$  é a densidade ( $\frac{Kg}{cm^3}$ );
- $g$  é a gravidade ( $\frac{m}{s^2}$ );
- $h$  é a altura da camada ( $m$ );
- $A_{thix}$  é a taxa de estruturação ( $\frac{Pa}{s}$ ).

Segundo Wangler *et al.* (2016), pode ocorrer a formação de juntas frias entre as camadas caso um tempo crítico seja excedido. Esse tempo crítico ( $t_{h,max}$ ) é determinado pela Equação (2).

$$t_{h,max} = \frac{\sqrt{\frac{(\rho gh)^2}{12} + \left(\frac{2\mu_p V}{h}\right)^2}}{A_{thix}} \quad (2)$$

Em que,

- $\rho$  é a densidade ( $\frac{Kg}{cm^3}$ );
- $g$  é a gravidade ( $\frac{m}{s^2}$ );
- $h$  é a altura da camada ( $m$ );
- $\mu_p$  é a viscosidade plástica do material ( $Pa s$ );
- $V$  é a velocidade horizontal de impressão dos elementos - mínima e máxima ( $\frac{m}{s}$ );
- $A_{thix}$  é a taxa de estruturação ( $\frac{Pa}{s}$ ).

A evolução da tensão de escoamento está diretamente ligada ao desenvolvimento microestrutural do concreto. Portanto, a avaliação da tensão de escoamento em diferentes períodos é de grande relevância para o entendimento da estruturação interna do material. Essa evolução é denominada de taxa de estruturação (ROUSSEL; CUSSIGH, 2008).

Para Roussel e Cussigh (2008), a estruturação interna do material deve apresentar resistência ao escoamento superior às tensões que estão sendo impostas, como as tensões de cisalhamento causadas pelo seu peso próprio e das camadas subsequentes. Para a quantificação da taxa de estruturação são necessárias medições da tensão de escoamento durante alguns períodos. Para isso, Roussel e Cussigh (2008) propuseram um modelo para a obtenção de uma estimativa da taxa de estruturação ( $A_{thix}$ ), apresentada na Equação (3).



$$A_{thix} = \frac{\tau_{0,t} - \tau_{00}}{t} \quad (3)$$

Em que,

- $A_{thix}$  é a taxa de estruturação ( $\frac{Pa}{s}$ );
- $\tau_{0,t}$  é a tensão de escoamento após  $t$  segundo ( $Pa$ );
- $\tau_{00}$  é a tensão de escoamento inicial ( $Pa$ );
- $t$  é o tempo total (s).

### 2.1.5.2 Desempenho no estado endurecido

As propriedades do concreto de manufatura aditiva no estado endurecido estão diretamente ligadas às suas propriedades no estado fresco. Quando comparadas com o concreto convencional, os principais desafios encontrados são: a resistência da união entre as camadas, a anisotropia e a durabilidade (HOU *et al.*, 2021).

Beushausen e Alexander (2008) observaram que a aderência entre as camadas está relacionada com as interações mecânicas e as ligações químicas. Em relação às interações mecânicas dois fatores são relevantes, a rugosidade superficial e a área de contato da superfície.

O desempenho mecânico da aderência intercamadas está relacionado a vários fatores, os principais são: tempo de impressão, velocidade de impressão, altura do bico de impressão, propriedades tixotrópicas, evolução da tensão de escoamento e fatores ambientais (umidade) (ROUSSEL; CUSSIGH, 2008; WANGLER *et al.*, 2016; PANDA *et al.*, 2019). Inúmeras metodologias foram desenvolvidas para aumentar a resistência da união intercamadas, como: a adição de uma camada polimérica, a produção de concretos poliméricos e concretos modificados por polímeros (HOSSEINI *et al.*, 2019; WANG, L. *et al.*, 2020).

A anisotropia do concreto de impressão 3D está relacionada às diferentes propriedades mecânicas em relação à direção de impressão. Portanto, as propriedades mecânicas são fortemente influenciadas pela direção em que o concreto foi impresso (HOU *et al.*, 2021). Le *et al.* (2012b) observaram que a resistência à compressão foi mínima quando o carregamento era paralelo às camadas. Panda, Paul e Tan (2017) obtiveram resultados semelhantes em relação à resistência à flexão. Essa menor resistência à compressão e à flexão no eixo paralelo entre as camadas ocorre devido à aderência intercamadas, elo mais fraco das peças de concreto de impressão 3D.

Em relação à durabilidade dos elementos de concreto de impressão 3D, existem poucas publicações relacionadas ao tema. A durabilidade do concreto depende do seu desempenho em serviço, para isso alguns fatores ambientais devem ser levados em

consideração, como: carbonatação, penetração de cloreto e reação álcali-agregado (HOU *et al.*, 2021).

A aderência intercamadas e a retração plástica mais acentuada são fatores importantes que devem ser levados em consideração na durabilidade do concreto. A retração plástica mais acentuada no concreto de impressão 3D, ocorre devido à maior exposição dos elementos de concretos impressos ao ambiente, provocando a formação de trincas e fissuras (BUSWELL *et al.*, 2018). No entanto, existem inúmeras soluções para mitigar os efeitos da retração plástica, como: cura interna, fibras, aditivos redutores e compensadores de retração (HOU *et al.*, 2021).

## 2.2 CONSIDERAÇÕES SOBRE CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS

A seção atual abordará alguns conceitos importantes sobre o concreto reforçado com fibras (CRF). Após a apresentação inicial, será exposto os tipos de fibras e o seus efeitos nas propriedades do concreto.

### 2.2.1 Introdução

Os primeiros trabalhos desenvolvidos relacionados ao concreto reforçado com fibras (CRF) foram realizados nos Estados Unidos da América no final da década de 1950 pela Associação de Cimento Portland (PCA) (DI PRISCO; COLOMBO; DOZIO, 2013). Todavia, somente na segunda metade do século XX uma ampla gama de publicações referentes ao CRF foram apresentadas (NAAMAN; SHAH, 1975). Portanto, o CRF é um material bastante explorado, com uma grande quantidade de trabalhos desenvolvidos.

Dado o embasamento histórico do CRF, é importante enfatizar que o CRF surgiu como uma alternativa para suprir o baixo desempenho mecânico à tração do concreto convencional, assim como o concreto armado (MEHTA; MONTEIRO, 2017). Portanto, uma das maneiras de diminuir os efeitos da fissuração e conseqüentemente da ruptura do concreto é com a adição das fibras. Para isso, o desenvolvimento da tecnologia das fibras foi de grande importância para o avanço tecnológico do CRF (FIGUEIREDO, 2011).

### 2.2.2 As fibras e seus efeitos nas propriedades do concreto

A principal característica das fibras é a de possuírem o comprimento muito maior do que a sua seção transversal, podendo ser fabricadas de diversos tipos de materiais, como: vidro, aço, sintéticas e naturais. A seguir, serão expostos os efeitos da incorporação das fibras no concreto em seus estados fresco e endurecido, bem como as características gerais dos diferentes tipos de fibras.

### 2.2.2.1 Efeito da incorporação das fibras sobre as propriedades do concreto

Os efeitos da adição de fibras já são bem estabelecidos. Primeiramente, no estado fresco, o concreto apresenta uma diminuição de sua trabalhabilidade. O seu elevado teor pode ocasionar segregação, bem como o aparacimento de "ouriços" nos elementos de concreto (FIGUEIREDO, 2011). No estado endurecido, após a ruptura do CRF, as fibras atuam na transferência de tensões solicitantes entre as fissuras, propriedade conhecida na bibliografia como "ponte de tensões" (FIGUEIREDO, 2011).

#### 2.2.2.1.1 Efeito no estado fresco

A adição de fibras no concreto afeta algumas propriedades no estado fresco, entre elas: diminuição da trabalhabilidade e da fissuração por retração plástica. Em relação à trabalhabilidade, as fibras alteram a mobilidade e a consistência da mistura de concreto. Essa modificação depende de vários fatores, como: material que compõe a fibra, o seu teor e a sua geometria (FIGUEIREDO, 2011).

Para Figueiredo (2011), essa alteração ocorre por dois fatores principais. Primeiramente, ao adicionar fibras, principalmente as de maiores dimensões, a mobilidade das partículas (agregados) é restringida. Segundo, e o principal para o concreto de impressão 3D, a incorporação das fibras demanda uma maior quantidade de água de molhagem, devido à sua grande área superficial, provocando o aumento da coesão e perda de mobilidade do concreto no estado fresco (FIGUEIREDO, 2011).

Um dos efeitos benéficos da incorporação das fibras no estado fresco é o controle da fissuração por retração plástica. As fibras são capazes de conter o aumento das microfissuras, restringindo o avanço das aberturas por meio da dissipação da energia (ACI COMMITTEE, 1996).

#### 2.2.2.1.2 Efeito no estado endurecido

Um dos principais efeitos das fibras no estado endurecido é na transferência de tensões entre as fissuras. Porém, quando adicionadas em teores inadequados alguns efeitos negativos podem ser ocasionados.

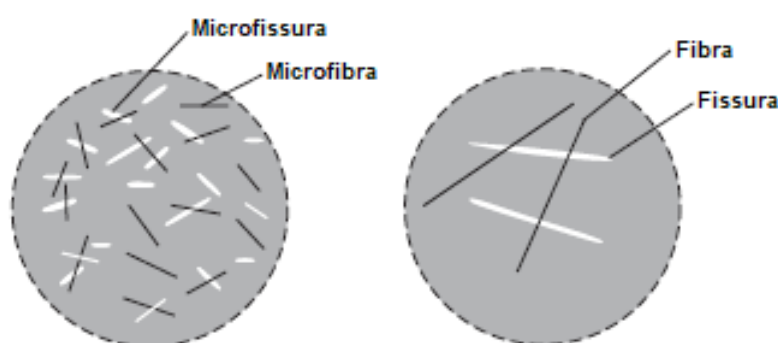
Primeiramente, quando as fibras são adicionadas em teores elevados pode ocorrer o surgimento de segregação do material. A segregação das fibras acarreta no surgimento de regiões de menor desempenho mecânico, apresentando o efeito inverso ao que é desejável. Outra característica de altos teores de fibras é o aumento da porosidade do concreto, a diminuição da resistência à compressão e do módulo de elasticidade (ACI COMMITTEE, 1996). No entanto, quando as fibras são adicionadas em baixos teores, o seu desempenho à tração e à compressão é significativamente afetados (TANESI, 1999).

A incorporação das fibras em teores controlados apresenta alguns benefícios ao desempenho mecânico. Neste sentido o seu principal papel é o de dificultar a propagação de fissuras, proporcionando um aumento da tenacidade ao elemento de CRF. Portanto, a sua função em relação ao desempenho mecânico é na fase pós-fissuração (FIGUEIREDO, 2011).

Essa característica do CRF ocorre devido às "pontes de tensões", que interrompem a formação das fissuras e microfissuras. Já que após a fissuração da matriz do compósito, as tensões são transferidas para as fibras, sendo distribuídas para locais afastados da fissura, impedindo o surgimento de uma ruptura brusca no CRF (MEHTA; MONTEIRO, 2017).

Nesse sentido, duas características são de grande relevância para o desempenho mecânico do CRF: a capacidade de carga da fibra e a aderência entre a fibra e a matriz do compósito (FIGUEIREDO, 1997). Na Figura 3 é apresentada uma ilustração do fenômeno de transferência de tensões entre fibra e matriz.

Figura 3 – Transferência de tensões entre as fibras e a matriz.



Fonte: Mehta e Monteiro (2017), Adaptado.

Na Figura 3 é possível observar que as fibras transferem as tensões. Nas regiões da matriz sem fibras ocorrerá uma ruptura rápida do material. Quando as fibras são adicionadas em teores adequados e apresentam uma resistência apropriada, atuam como ponte de transferência de tensões (FIGUEIREDO, 2011).

#### 2.2.2.2 Tipos de fibras

Figueiredo (2011) define as fibras como elementos descontínuos, cujo comprimento é muito maior que a seção transversal. Em relação às microfibras sintéticas utilizadas neste trabalho (polipropileno), cujo o diâmetro varia entre 5 a 100  $\mu m$  e comprimento de 5 a 30  $mm$ , podem controlar a fissuração por retração plástica. No entanto, elas não apresentam influência significativa no desempenho no estado endurecido do compósito, quando comparadas com as fibras de aço (YIN, S. *et al.*, 2015; PELISSER

*et al.*, 2010). Na Tabela 1, são listadas algumas propriedades típicas de diversos tipos de fibras e a propriedade da matriz cimentícia sem fibras para comparação.

Tabela 1 – Propriedades típicas das fibras.

<b>Fibra</b>	<b>Diâmetro (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Módulo de Elasticidade (GPa)</b>	<b>Resistência à Tração (GPa)</b>	<b>Deformação até ruptura (%)</b>
Aço	5-500	200	0,5-2,0	0,5-3,5
Vidro	9-15	70-80	2-4	2-3,5
Polipropileno	20-400	3,5-10	0,45-0,76	15-25
Carbono	8-9	230-380	2,5-4,0	0,5-1,5
Nylon	23-400	4,1-5,2	0,75-1,0	16,0-20,0
Celulose	-	10	0,3-0,5	-
Acrílico	18	14-19,5	0,4-1,0	3
Polietileno	25-1000	5	0,08-0,60	3-100
Madeira	-	71,0	0,9	-
Matriz cimentícia	-	10-45	0,003-0,007	0,02

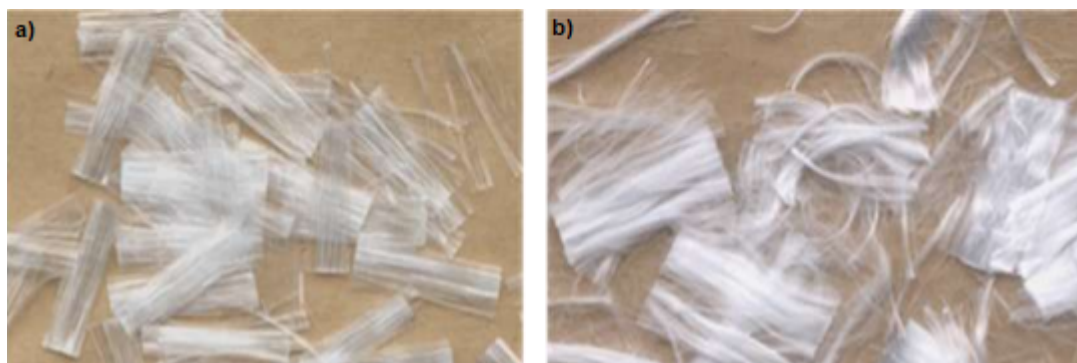
Fonte: Bentur e Mindess (2006), Adaptado.

#### 2.2.2.2.1 Microfibras de polipropileno

As fibras sintéticas (polipropileno), são divididas em relação à sua geometria em: macrofibras e microfibras. As microfibras de polipropileno são amplamente utilizadas no Brasil para o combate da retração plástica. No entanto, Pelisser *et al.* (2010) observaram que os efeitos das microfibras de polipropileno no estado endurecido são insignificantes, principalmente em relação ao desempenho mecânico.

As microfibras de polipropileno são divididas em dois tipos básicos, as monofilamento e as fibriladas. As fibriladas apresentam uma seção retangular (Figura 4), promovendo um aumento da adesão entre a fibra e a matriz. Já as de monofilamento (Figura 4), consiste em fios que foram cortados em comprimento padrão (FIGUEIREDO, 2011).

Figura 4 – Fibras de polipropileno: a) fibriladas; b) monofilamento.



Fonte: Figueiredo (2005), Adaptado.

#### 2.2.2.2 Microfibras de aço

As fibras de aço já estão normatizadas no Brasil pela NBR 15530 (ABNT, 2019b), em que determina a tipologia e a classificação dessas fibras. Primeiramente, pela norma são previstos três tipos básicos de fibras em função de sua geometria: Tipo A, fibra de aço com ancoragem nas extremidades; Tipo B, fibra de aço corrugada; Tipo R, fibra de aço reta. Essa configuração geométrica dos tipos de fibras de aço não contempla a seção transversal, somente a seção longitudinal da fibra.

Ainda na NBR 15530 (ABNT, 2019b), as fibras de aço são classificadas de acordo com o tipo de aço, em: Classe I, fibra oriunda de arame trefilado a frio; Classe II, fibra oriunda de chapa laminada cortada a frio; Classe III, fibra oriunda de arame trefilado e escarificado. A seção transversal da fibra de aço está diretamente relacionada com o tipo de aço com o qual ela foi fabricada. A NBR 15530 (ABNT, 2019b) cobre a grande maioria das fibras de aço encontradas no mercado brasileiro, se não a totalidade.

No presente trabalho, serão utilizadas microfibras de aço do Tipo R e Classe I (Fibra de aço reta oriunda de arame trefilado a frio), conforme a classificação da NBR 15530 (ABNT, 2019b).

### 2.3 CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS COMO MATERIAL DE IMPRESSÃO

A seção atual abordará alguns conceitos da incorporação de fibras na manufatura aditiva de concreto. Após a sua introdução inicial, serão apresentadas as justificativas de seu uso, as suas vantagens e as suas desvantagens. Por fim, serão discutidos os diferentes métodos para avaliar as propriedades no estado fresco e endurecido das peças de concreto de impressão 3D com incorporação de fibras.

### 2.3.1 Introdução

A utilização de microfibras no concreto de impressão 3D é recente, sendo que grande parte das publicações foram realizadas a partir de 2017. Em sua grande maioria o principal enfoque dos estudos é na avaliação das propriedades mecânicas, sendo em menor número os que exploraram o desempenho no seu estado fresco.

A adição de fibras no concreto de manufatura aditiva surgiu da necessidade da aplicação de reforços nas peças projetadas. No entanto, algumas vantagens e desvantagens apareceram diante da sua incorporação, sendo que os maiores prejuízos estão relacionados ao seu estado fresco como será discutido nas seções seguintes.

### 2.3.2 Justificativas do uso das fibras no concreto de manufatura aditiva

O concreto é um material que sofreu avanços significativos desde que foi introduzido há cerca de duzentos anos, a sua resistência à compressão apresentou durante esse período um aumento quase que contínuo (LI *et al.*, 2020). Aliado ao ganho de resistência, foram introduzidos reforços com a utilização de barras e telas metálicas a fim de mitigar as regiões com maior fragilidade estrutural. Além do desenvolvimento do concreto armado, outras alternativas para o reforço estrutural das peças de concreto surgiram, como a incorporação de fibras de variados tipos de materiais.

Entretanto, no recente desenvolvimento da manufatura aditiva de concreto uma das maiores dificuldades encontradas foi na aplicação de reforços estruturais durante o seu processo produtivo, já que as técnicas convencionais são incompatíveis com a manufatura aditiva ou anulam os seus benefícios (BOS; BOSCO; SALET, 2019).

Diversos métodos de reforço foram investigados, como: aplicação de pregos em formato de U (WANG, L. *et al.*, 2021), utilização de barras de aço após a sua impressão (XIAO *et al.*, 2022) e de barras de polímero reforçado com fibra de basalto (SUN; GAO; WANG, H., 2021). Além dessas estratégias de reforço do concreto de manufatura aditiva, uma que vem ganhando destaque é a incorporação de fibras.

No concreto convencional, diferentes tipos de fibras podem ser introduzidas para reduzir as fissuras de retração e para substituir totalmente ou parcialmente telas e barras de aço para seu reforço. Visto essas características, diversos trabalhos foram realizados com o objetivo de reforçar e melhorar as propriedades do concreto de manufatura aditiva com a adição de variados tipos de fibras (HAMBACH; VOLKMER, 2017; PANDA; PAUL; TAN, 2017; BOS; BOSCO; SALET, 2019; NEMATOLLAHI *et al.*, 2018a, 2018b; ARUNOTHAYAN *et al.*, 2020; YE *et al.*, 2021; SCHULTE *et al.*, 2021).

Entre esses estudos, diversas vantagens e desvantagens foram observadas ao se incorporar fibras na manufatura aditiva de concreto.

### 2.3.3 Vantagens da incorporação das fibras no concreto de impressão 3D

#### 2.3.3.1 Vantagens no estado fresco

A incorporação de fibras no concreto de manufatura aditiva promove mudanças significativas na coesão do material. Arunothayan *et al.* (2020) observaram em seus resultados um aumento da coesão das amostras em que as fibras foram incorporadas.

Esse efeito ocorre devido a fraca força adesiva entre as fibras e a matriz e pelo aumento da área de superfície interna por unidade de volume, que provoca um aumento da adsorção de água na mistura. Isto resultou no aumento da coesão da mistura e conseqüentemente da capacidade de retenção de forma das amostras, efeito desejável para os critérios de construtibilidade do material.

Outro efeito interessante é no alinhamento preferencial das fibras. Na manufatura aditiva de concreto a orientação das fibras é induzida pelo bocal da extrusora que permite o alinhamento delas ao longo do caminho de impressão. Essa orientação preferencial pode ser benéfica com o aumento na resistência à flexão das estruturas impressas. Ma *et al.* (2019) obtiveram um aumento de resistência à tração e à flexão nas amostras em que as fibras apresentavam um alinhamento preferencial.

Um dos grandes influenciadores da orientação preferencial das fibras é o tamanho do bocal da extrusora em relação ao comprimento das fibras. Segundo Yan *et al.* (2022) para bico de extrusora mais estreita as fibras obtiveram um maior alinhamento em relação à direção de impressão.

#### 2.3.3.2 Vantagens no estado endurecido

Entre as vantagens no estado endurecido na incorporação de fibras na manufatura aditiva, está a melhoria de seu desempenho mecânico, principalmente em relação à resistência à flexão e da união entre as camadas de acordo com o posicionamento preferencial das fibras.

Em alguns trabalhos desenvolvidos até o momento a incorporação de fibras melhorou o seu comportamento mecânico à flexão significativamente para teores superiores à 1% (HAMBACH; VOLKMER, 2017; PANDA; PAUL; TAN, 2017; ARUNOTHAYAN *et al.*, 2020; YE *et al.*, 2021).

### 2.3.4 Desvantagens da incorporação das fibras no concreto de impressão 3D

#### 2.3.4.1 Desvantagens no estado fresco

Uma das características da adição das fibras no concreto é a alteração da trabalhabilidade do material. Esse efeito ocorre devido à grande área superficial das fibras que adsorvem água. Arunothayan *et al.* (2020) obtiveram uma redução significativa da trabalhabilidade ao adicionar microfibras de aço na manufatura aditiva de concreto.



Diferentes tipos de fibras apresentarão áreas superficiais distintas, portanto, diferentes influências na trabalhabilidade do material.

Uma das formas de avaliar a extrudabilidade do material frente à diminuição da trabalhabilidade com a adição de fibras é por meio da avaliação do índice de consistência (mesa de consistência). Tay, Qian e Tan (2019) determinaram a capacidade de impressão de amostras distintas por meio do índice de consistência, em que foram estabelecidos os valores em que o concreto era imprimível.

A partir de um índice de consistência previamente estabelecido para o equipamento de impressão utilizado no estudo é possível avaliar diferentes composições de amostras, correlacionando o índice de consistência com a capacidade de impressão.

Em conjunto com a perda de trabalhabilidade, a maior adsorção de água pelas fibras provoca uma maior coesão na mistura. Apresentando seus efeitos benéficos em relação à construtibilidade do material. No entanto, em relação à extrudabilidade o efeito é maléfico, já que o concreto necessita passar pelo bico da extrusora sem provocar entupimento do equipamento. Um material muito coeso com fibras pode apresentar limitações na extrudabilidade de acordo com o equipamento utilizado.

#### 2.3.4.2 Desvantagens no estado endurecido

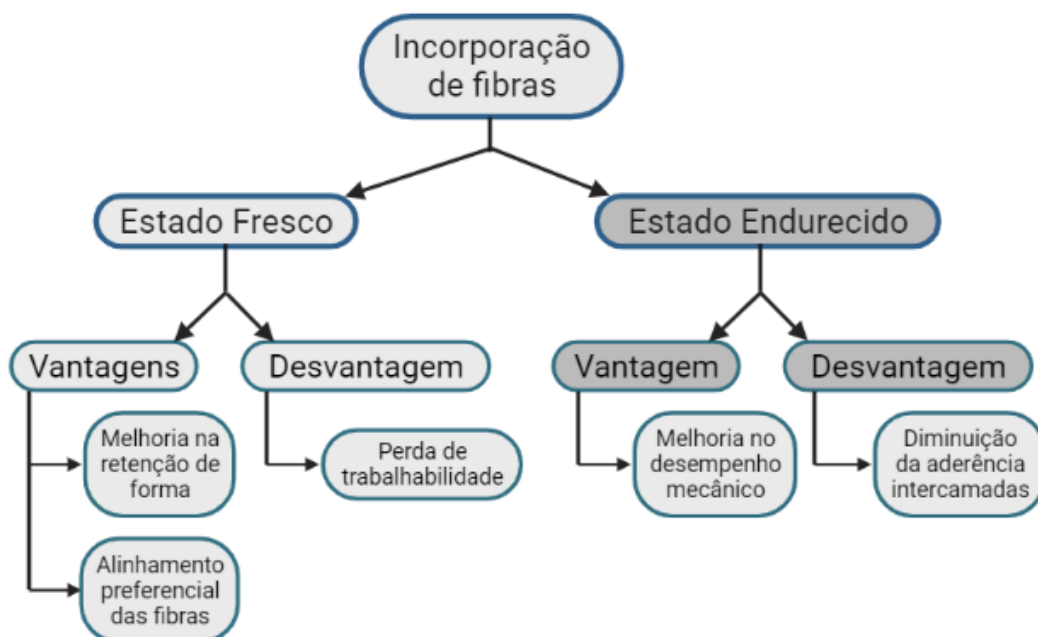
Um dos efeitos indesejados no estado endurecido observados na bibliografia é a diminuição da aderência entre os filamentos do concreto produzido por manufatura aditiva. Nematollahi *et al.* (2018a) obtiveram uma diminuição na resistência intercadas devido à maior coesão do material, ocasionada pela incorporação das fibras. Essa maior coesão provoca uma menor deformação do material quando uma nova camada é depositada.

O principal fator decorrente da diminuição da união entre as camadas, devido à adição das fibras, é a maior adsorção de água. Essa maior adsorção afeta o nível de umidade da superfície entre as camadas. Caso a superfície esteja seca, a ligação entre os filamentos não é desenvolvida (SANJAYAN *et al.*, 2018). Para Sanjayan *et al.* (2018), o nível de umidade entre as camadas é uma função de vários parâmetros, que incluem: o processo de impressão, a taxa de evaporação, a exsudação, além do nível de umidade da superfície durante o processo de extrusão da amostras.

Portanto, a resistência de união entre camada de concreto com fibras produzidos por manufatura aditiva necessita ser investigada de forma mais abrangente, em conjunto com o desenvolvimento de novos processos que melhorem o seu desempenho.

Na Figura 5 é apresentado um diagrama que resume as vantagens e as desvantagens da incorporação de fibras no concreto de manufatura aditiva.

Figura 5 – Resumo das vantagens e desvantagens da incorporação de fibras na manufatura aditiva.



Fonte: Autor, 2022.

### 2.3.5 Avaliação das peças de concreto de manufatura aditiva reforçado com fibras

Na bibliografia existente, diferentes métodos de avaliações das propriedades nos estados fresco e endurecido das peças de concreto de impressão 3D com incorporação de fibras foram realizadas. A seguir serão expostos os principais critérios e ensaios.

#### 2.3.5.1 Ensaios no estado fresco

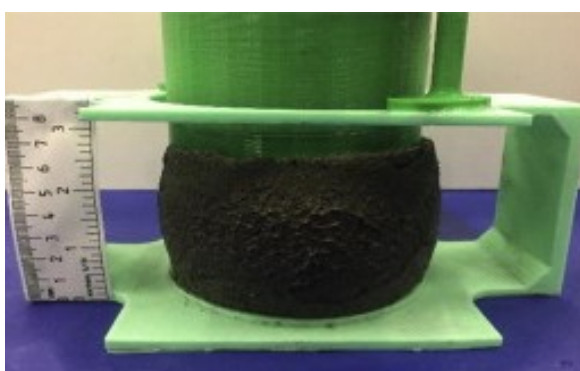
No estado fresco, após a passagem do material pelo equipamento, a principal propriedade a ser avaliada é a estabilidade de forma (construtibilidade). O material deve resistir à deformação durante a construção das camadas. As fibras podem contribuir ou não para uma maior estabilidade de forma, portanto, é necessário avaliar a deformação dos elementos.

Kazemian *et al.* (2017) especificaram os três principais fatores da deformação das camadas, sendo: o seu peso próprio, o peso das camadas subsequentes e a pressão da extrusão. Quando o material apresenta uma qualidade de impressão aceitável, uma camada sem deformação é produzida. No entanto, a influência do peso das camadas subsequentes e da pressão da extrusão deve ser investigada por meio de testes de estabilidade de forma. Diante da necessidade de se avaliar quantitativamente a construtibilidade alguns ensaios foram desenvolvidos.

O teste de estabilidade de cilindro, proposto por Kazemian *et al.* (2017), é realizado por meio de um aparato de ensaio (Figura 6). Após a disposição e compactação do material, o aparato é desmoldado e uma carga de 5,5 kg é aplicada. A deformação resultante do cilindro de concreto fresco é medida em relação à mudança de altura.

A principal vantagem deste teste está relacionada com a eliminação da necessidade de impressão do concreto, gerando uma economia de tempo. No entanto, as deformações obtidas seriam confiáveis somente para a comparação entre as amostras ensaiadas, já que o ensaio se distancia das reais condições de impressão.

Figura 6 – Ensaio de estabilidade de cilindro.



Fonte: Kazemian *et al.* (2017).

Arunothayan *et al.* (2020) realizaram um teste quantitativo para avaliar a estabilidade de forma. O ensaio era composto por cilindros de plásticos de 60 mm de diâmetro e 60 mm de altura, em que o material é depositado e levemente compactado. Após dois minutos o cilindro é retirado e uma placa é sobreposta no cilindro de concreto. Durante o carregamento da amostras, imagens são capturadas para a avaliação da mudança do diâmetro e da altura do concreto fresco. As principais vantagens e desvantagens do método se assemelham com o ensaio de estabilidade de cilindro proposto por Kazemian *et al.* (2017).

Kazemian *et al.* (2017) propuseram o teste de assentamento de camadas. O ensaio consiste na impressão de duas camadas, uma sobreposta a outra. Uma câmera é posicionada na parte frontal, além de uma régua posicionada na lateral da amostra como escala. Algumas imagens são registradas antes e depois da segunda camada ser impressa, assim por meio da análise dessas imagens é possível avaliar quantitativamente a deformação da primeira camada antes e após a aplicação da segunda camada. Esse método de ensaio é o que mais se aproxima das reais condições de impressão.

### 2.3.5.2 Ensaios no estado endurecido

Mehta e Monteiro (2017) definem a resistência de um material como a capacidade de resistir à tensão sem se romper. No concreto, essa resistência está relacionada à tensão necessária para causar a ruptura do elemento mesmo não havendo sinais visíveis de fratura.

Na construção civil, a propriedade mais preconizada no estado endurecido, é a sua resistência à compressão, devido à facilidade de medição para o controle de qualidade no material (MEHTA; MONTEIRO, 2017). No entanto, outras propriedades mecânica também são bastante relevantes, como a resistência à tração e ao cisalhamento.

Como apresentado na seção 2.1.5.2 uma das principais características dos elementos de impressão 3D de concreto é a de possuírem propriedades anisotrópicas em direções distintas. Como as peças são produzidas por camadas sobrepostas, é esperado um melhor desempenho na direção horizontal em relação à vertical (LE *et al.*, 2012a; PANDA; PAUL; TAN, 2017). Portanto, quando comparado com o concreto convencional, os principais obstáculos das propriedades mecânicas do concreto de manufatura aditiva são relacionados à aderência intercamadas e a anisotropia.

Para a qualificação dos elementos de concreto de impressão 3D com incorporação de fibras, diferentes métodos foram desenvolvidos para avaliar as suas propriedades no estado endurecido em relação à sua resistência à compressão e de aderência entre as camadas.

#### 2.3.5.2.1 Resistência à compressão

Os procedimentos de ensaios relacionadas à resistência à compressão podem ser próximos ao do concreto convencional. No entanto, devido à anisotropia das amostras são necessárias algumas modificações em relação aos métodos existentes. Os ensaios de corpos de prova anisotrópicos requerem diferentes direções de carregamento, possuindo a direção perpendicular ou paralela em relação a união entre as camadas (PANDA; PAUL; TAN, 2017; HOU *et al.*, 2021).

Le *et al.* (2012a) realizaram ensaio de resistência à compressão axial de amostras cúbicas de 10 *cm* extraídas de placas impressas de (35x35x12) *cm* e (50x35x12) *cm*, com 28 dias de cura. Os corpos de prova foram submetidos ao carregamento em duas direções, perpendicular e paralela. Os autores concluíram que a resistência à compressão axial mínima ocorreu quando o carregamento foi paralelo às camadas.

Pham, Tran e Jay Sanjayan (2020) produziram amostras impressas e moldadas de concreto com microfibras de aço (3 *mm* e 6 *mm* de comprimento) e de amostras de referência sem fibras. Para a realização do ensaio à compressão, os corpos de

prova impressos foram extraídas em amostras cúbicas com 5 cm de aresta, sendo submetidas a três direções de carregamento.

Em relação às amostras moldadas, a incorporação das fibras representou um impacto positivo. Já as amostras impressas apresentaram desempenho inferior quando comparado às moldadas. Em relação às amostras impressas, as que apresentaram incorporação de fibras obtiveram desempenho superior em relação aos corpos de prova sem fibras.

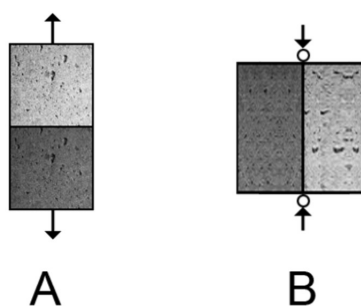
Wolfs, Bos e Salet (2019) efetuaram o teste de compressão axial de corpos de prova impressos cúbicos extraídos com 4 cm, em duas direções de carregamento, além de ensaio de compressão de amostras prismáticas moldadas com (4x4x16) cm. Os autores observaram uma resistência à compressão maior (aproximadamente 31%) das amostras moldadas em relação às impressas.

#### 2.3.5.2.2 Aderência entre as camadas

A aderência entre as camadas é uma das propriedades mais relevantes para o concreto de manufatura aditiva. O seu desempenho está diretamente ligado com as propriedades mecânicas e de durabilidade do material (NERELLA; HEMPEL; MECHTCHERINE, 2019). Vários fatores interferem em seu desempenho, como: intervalo de tempo entre a deposição das camadas, velocidade de impressão, altura do bico da extrusora e de razões do ambiente (condição de cura, umidade da superfície e da atividade dos aditivos) (HOU *et al.*, 2021).

Diante da necessidade de avaliar essa importante propriedade, diferentes métodos foram desenvolvidos baseados principalmente em ensaios que avaliam o desempenho da união entre concreto novo e antigo (ZAREIYAN; KHOSHNEVIS, 2017). Entre os métodos existentes os mais utilizados são os de tração direta (Figura 7 A) e o de tração por divisão (Figura 7 B).

Figura 7 – Métodos de teste de resistência da união entre camadas.



O ensaio de tração direta é um dos mais utilizados na bibliografia. Para a sua execução é necessário a aplicação de um material adesivo para unir a superfície da amostra com a placa de teste. O material adesivo deve apresentar resistência superior à aderência entre as camadas, evitando o rompimento em regiões indesejadas. Já o ensaio de tração por divisão não necessita da aplicação de um material adesivo, diminuindo a variabilidade na execução deste tipo de ensaio (WENG *et al.*, 2021). O procedimento experimental do ensaio de tração por divisão será melhor apresentado na próxima seção.

## 2.4 SÍNTESE DA FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A manufatura aditiva, nos últimos anos, vem ganhando destaque em vários setores da indústria entre eles o da construção civil. Todavia, a maioria dos estudos a respeito do uso do concreto como material de impressão 3D ainda está em sua fase inicial. Atualmente, a técnica de impressão 3D de concreto mais popular é a por extrusão, método baseado na deposição de sucessivas camadas pelo bico de uma extrusora (MOHAN *et al.*, 2021).

Os principais fatores de destaque da manufatura aditiva de concreto na construção civil, são: o menor custo em relação aos métodos tradicionais, a redução do tempo necessário para produção de peças de concreto, a diminuição do desperdício de materiais, as questões ambientais e o aumento da demanda global por infraestrutura e moradia (SOUZA *et al.*, 2020; KOTHMAN; FABER, 2016).

No entanto, alguns pontos ainda devem ser desenvolvidos para a sua utilização no canteiro de obras, entre elas: a otimização das propriedades no estado fresco para a extrudabilidade e construtibilidade do material, o desenvolvimento de técnicas que mitiguem o desenvolvimento de juntas frias durante o processo de impressão e a utilização de alternativas para o reforço das peças de concreto de impressão 3D.

Alguns requisitos técnicos, nos estados fresco e endurecido, devem ser atingidos para que o concreto seja impresso. A bibliografia atual define dois grandes grupos: a capacidade de impressão e o seu desempenho no estado endurecido (WANGLER *et al.*, 2016; KAZEMIAN *et al.*, 2017; HOU *et al.*, 2021).

A capacidade de impressão é composta por dois importantes requisitos, a extrudabilidade e a construtibilidade. A extrudabilidade é a capacidade do concreto ser transportado pela extrusora em fluxo contínuo. Já a construtibilidade é a capacidade do filamento de concreto de suportar o seu peso próprio e das camadas subsequentes, sem apresentar grandes deformações ou colapsar (HOU *et al.*, 2021).

Em relação ao desempenho no estado endurecido, três requisitos são relevantes: a aderência intercamadas, o desempenho mecânico e a durabilidade da peça de concreto (HOU *et al.*, 2021).

Visto que o concreto é um material com propriedade mecânica à tração signifi-

cativamente menor que à compressão, as peças de concreto demandam a introdução de reforços, como a de barras de aço ou mais recentemente com a incorporação de fibras. Todavia, as técnicas convencionais de reforços com barras de aço são incompatíveis com a manufatura aditiva ou anulam os seus principais benefícios (BOS; BOSCO; SALET, 2019). Portanto, uma das principais estratégias para atender a demanda estrutural dos elementos de concreto de impressão 3D é com a incorporação de fibras.

A grande maioria das bibliografias existentes, que incorporaram fibras na manufatura aditiva de concreto, investigaram as propriedades no estado endurecido, em que as fibras são utilizadas com a finalidade de melhorar o desempenho mecânico (HAMBACH; VOLKMER, 2017; PANDA; PAUL; TAN, 2017; NEMATOLLAHI *et al.*, 2018b; YE *et al.*, 2021). Poucas investigaram as propriedades das peças de concreto de impressão 3D com fibras em seu estado fresco.

Na bibliografia atual, algumas vantagens e desvantagens foram observadas ao se incorporar fibras na manufatura aditiva de concreto. Dentro das vantagens encontradas, estão: a melhoria na construtibilidade, o alinhamento preferencial das fibras induzido pelo bico da extrusora e a melhoria no desempenho mecânico. Já entre os efeitos negativos, estão: a diminuição da trabalhabilidade, a piora na extrudabilidade e a diminuição da resistência da união entre as camadas.

Visto que a incorporação de diferentes tipos de fibras apresentara vantagens e desvantagens distintas, este trabalho selecionou dois tipos de fibras para a investigação, sendo uma sintética e outra de aço.

A microfibras sintética selecionada é a de polipropileno devido: ao seu grande fator de forma e área superficial que permite maior coesão do concreto, além da sua disponibilidade na região. Já a microfibras de aço foi escolhida devido ao seu maior desempenho mecânico em relação a outros tipos de fibras (ARUNOTHAYAN *et al.*, 2020).

Portanto, este trabalho tem a finalidade de contribuir no desenvolvimento da manufatura aditiva de concreto, busca em sua metodologia: avaliar as propriedades do concreto em seu estado fresco por meio da utilização de um método para avaliação da estabilidade de forma do material, avaliar o desempenho da aderência entre camadas com o teste de partição de prisma, aplicar um novo processo para a melhoria da união entre as camadas com a aplicação de borrifamento de água e determinar as propriedades mecânicas das peças analisadas (resistência à compressão axial e à tração na flexão).

### 3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

A fim de alcançar os objetivos propostos por este trabalho, nesta seção será apresentado o programa experimental desenvolvido com base na revisão bibliográfica. As atividades, em sua maioria, foram realizadas no Laboratório de Aplicações de Nanotecnologia em Construção Civil (NANOTEC) e no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC), ambos no departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

Este trabalho dá continuidade aos estudos realizados pelo grupo de pesquisa de impressão 3D, introduzidos inicialmente por Padilha (2020) e Rubin (2021). Padilha (2020) avaliou as propriedades mecânicas de elementos de concreto produzidos por impressão 3D, por meio dos ensaios: de aderência entre as camadas, resistência à compressão e à tração na flexão. Rubin (2021) investigou as propriedades reológicas e mecânicas de concreto para impressão 3D, com os ensaios: de cisalhamento direto, de reometria rotacional, de resistência à tração e à compressão.

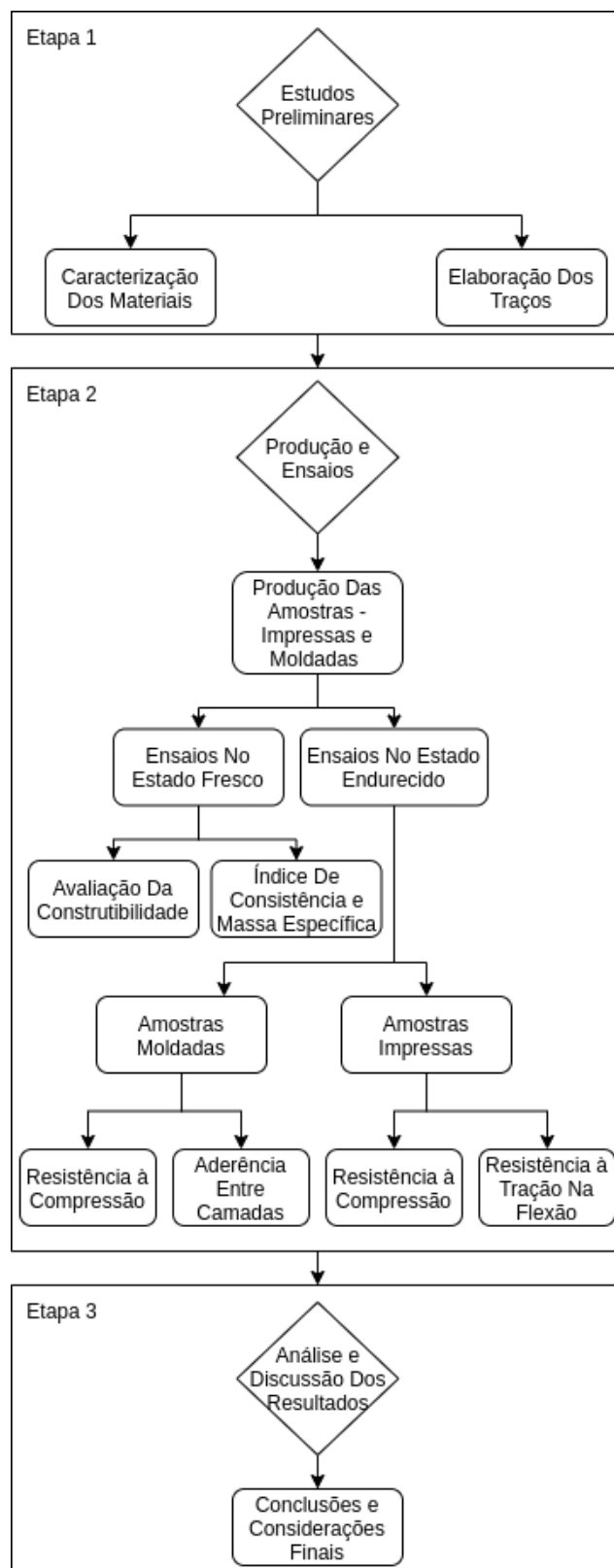
Diante da necessidade em desenvolver um novo procedimento que promovesse a aplicação de reforço ao concreto de impressão 3D, este trabalho buscou com a incorporação das microfibras atender a esta lacuna. Portanto, após a etapa de revisão bibliográfica, foram executados testes preliminares com diferentes proporções de materiais, variando a quantidade de aditivo superplastificante e o teor de fibras. Apresentado como base a composição do concreto desenvolvida pelo grupo de pesquisa de impressão 3D.

A partir de então, foram produzidas as misturas para a preparação das amostras impressas e moldadas. No estado fresco foi investigado a construtibilidade das peças impressas por meio do teste de assentamento de camadas proposto por Kazemian *et al.* (2017). Já no estado endurecido foram investigadas a resistência à compressão e de aderência entre camadas para as amostras impressas e de resistência à compressão e à tração por flexão para os corpos de prova moldados.

A Figura 8 apresenta o fluxograma geral do estudo realizado, abrangendo todos os processos necessários para o seu desenvolvimento.



Figura 8 – Fluxograma geral do programa experimental.



Fonte: Autor, 2022.

### 3.1 ESTUDOS PRELIMINARES

A primeira etapa do programa experimental consistiu aos estudos preliminares. Primeiramente os materiais foram caracterizados, em seguida, foram realizados a elaboração das composições.

#### 3.1.1 Caracterização dos materiais

A caracterização dos materiais seguiu as especificações normativas. Adiante serão apresentados os materiais que foram utilizados para a realização deste trabalho. A seleção foi baseada na adequação técnica e na disponibilidade geográfica dos materiais. Alguns materiais, como: cimento Portland, fíler calcário, sílica ativa e aditivo superplastificante, já foram utilizados por trabalhos anteriores do grupo de pesquisa de impressão 3D (PADILHA, 2020; RUBIN, 2021).

##### 3.1.1.1 Cimento Portland

O cimento utilizado é o CP V-ARI. Esse aglomerante foi selecionado por dois fatores técnicos. Primeiramente, devido à necessidade de uma maior resistência mecânica inicial requerida pela manufatura aditiva. Segundo, pela menor presença de adições minerais. O CP V-ARI utilizado foi produzido no município de Balsa Nova - PR. Nas Tabela 2 e Tabela 3 são apresentadas as características físicas e químicas do material, segundo o fabricante.

Tabela 2 – Características físicas do cimento CP V-ARI.

<b>Análise física</b>		
Tempo de pega ( <i>min</i> )	Início	155
	Fim	210
Consistência normal ( <i>cm</i> )		29,6
Superfície específica de Blaine ( $\frac{cm^2}{g}$ )		4330
Peneira #200 <i>mm</i> (%)		0,2
Peneira #325 <i>mm</i> (%)		0,7
Massa específica ( $\frac{g}{cm^3}$ )		3,09
Expansibilidade a quente ( <i>mm</i> )		0
	1 dia	21,5
	3 dias	37,8
	7 dias	43,2
	28 dias	52,6
Resistência à compressão axial ( <i>MPa</i> )		

Fonte: Cimento ITAMBÉ®(2022).

Tabela 3 – Características químicas do cimento CP V-ARI.

<b>Análise química (%)</b>	
$Al_2O_3$	4,52
$SiO_2$	18,2
$Fe_2O_3$	2,63
$CaO$	63,27
$MgO$	3,14
$SO_3$	2,60
CaO livre	1,93
Resíduos insolúveis	0,47
Perda ao fogo	3,21

Fonte: Cimento ITAMBÉ®(2022).

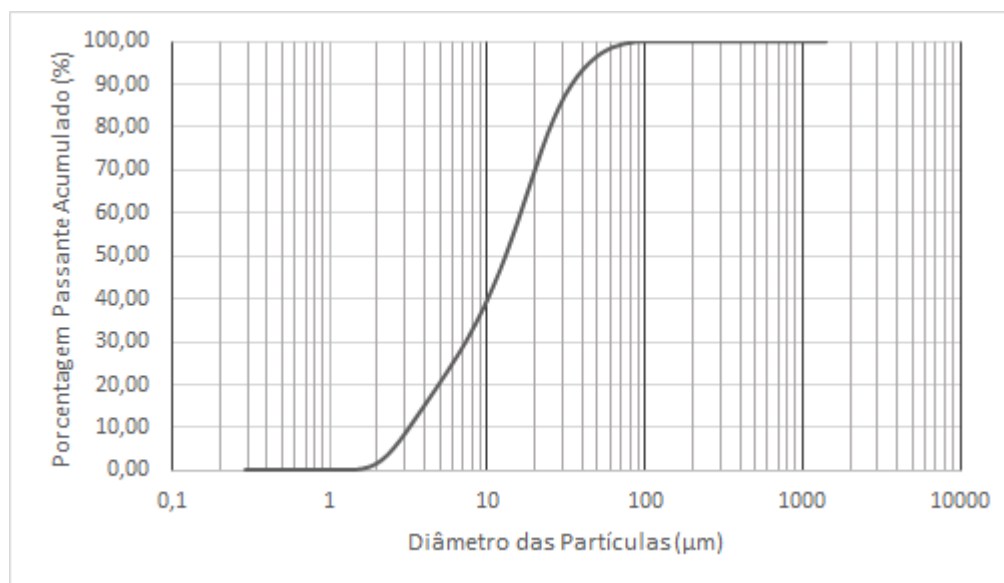
A determinação da distribuição granulométrica do cimento Portland utilizado foi realizada em um granulômetro a laser de marca/modelo Microtrac S3500, sem meio dispersante, o intervalo da análise foi de 0,289  $\mu m$  a 1408  $\mu m$ . Na Tabela 4 é apresentado a porcentagem de material passante com os respectivos diâmetros. Na Figura 9 é apresentada a porcentagem de material passante acumulado.

Tabela 4 – Distribuição granulométrica do cimento.

<b>Percentual (%)</b>	<b>Diâmetro das partículas (<math>\mu m</math>)</b>
10	3,19
20	4,90
30	7,27
40	10,02
50	12,98
60	16,19
70	19,93
80	24,93
90	34,14
95	44,06

Fonte: Autor, 2022.

Figura 9 – Curva granulométrica do cimento.



Fonte: Autor, 2022.

### 3.1.1.2 Areia

O agregado miúdo selecionado é a areia fina proveniente de dunas na região de Florianópolis no estado de Santa Catarina. A areia apresenta dimensão máxima de 1,18 mm. Essa escolha ocorreu devido à composição desse tipo de material ser predominantemente fino e contínuo, adequado para a necessidade de produção de uma mistura mais coesa para a impressão 3D.

Após o recebimento da areia, o material foi seco em estufa por 12h à  $(105 \pm 5)$  °C. Em seguida, a areia foi peneirada em peneira com malha metálica de 1,18 mm, o material passante foi utilizado.

Seguindo as recomendações normativas, as seguintes especificações foram empregadas: recebimento da areia de acordo com as especificações da NBR 7211 (ABNT, 2009); densidade pela NBR 16916 (ABNT, 2021); composição granulométrica pela NBR NM 248 (ABNT, 2003). A amostra de areia utilizada apresentou massa específica de  $2,63 \text{ g/cm}^3$ .

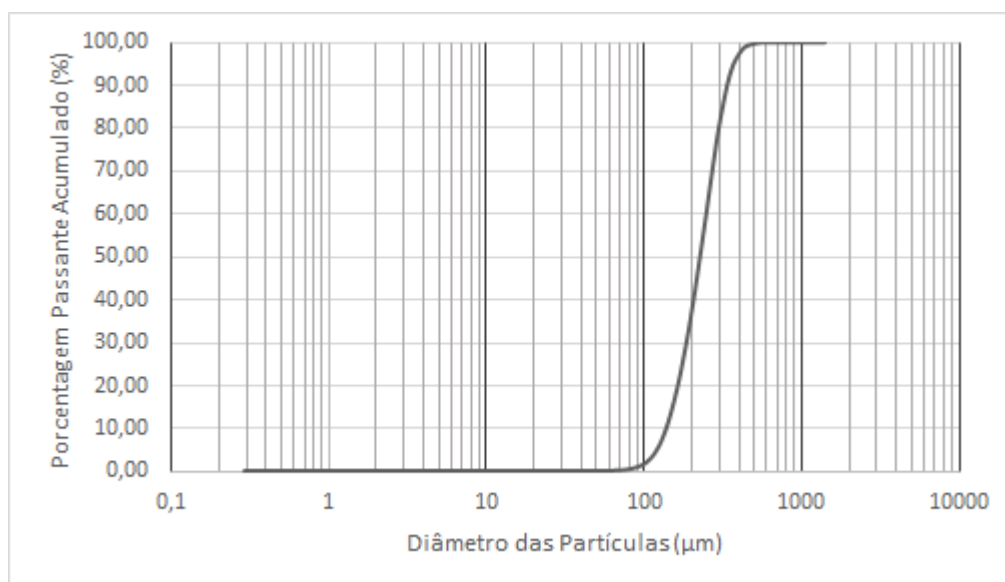
Para a caracterização foi realizado o ensaio de granulométrica a laser, em um granulômetro de marca/modelo Microtrac S3500, sem meio dispersante, o intervalo da análise foi de  $0,289 \mu\text{m}$  a  $1408 \mu\text{m}$ . Na Tabela 5 e Figura 10 é apresentada a distribuição granulométrica da areia. Na Figura 11 é exibida a amostra da areia.

Tabela 5 – Distribuição granulométrica da areia.

Percentual (%)	Diâmetro das partículas ( $\mu m$ )
10	138,2
20	163,7
30	185,5
40	206,1
50	226,5
60	247,8
70	270,6
80	297,9
90	336,6
95	370,6

Fonte: Autor, 2022.

Figura 10 – Curva granulométrica da areia.



Fonte: Autor, 2022.

Figura 11 – Amostra da areia.



Fonte: Autor, 2021.

### 3.1.1.3 Fíler calcário

O fíler calcário utilizado é proveniente da britagem de calcário, esse material foi selecionado para aumentar a quantidade de materiais finos na mistura e diminuir o consumo do cimento Portland.

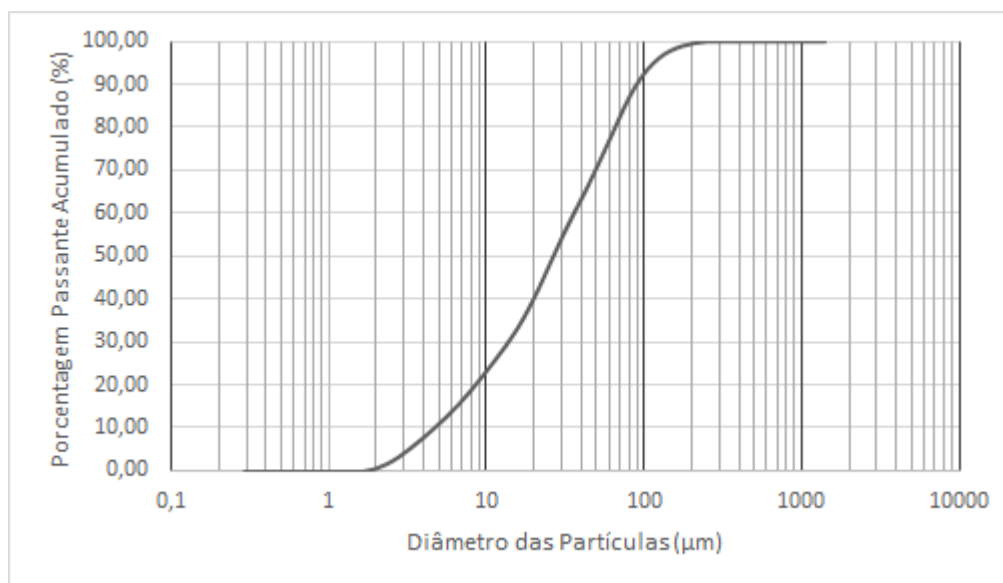
A determinação da distribuição granulométrica do fíler foi realizado em um granulômetro à laser marca/modelo Microtrac S3500, sem meio dispersante, o intervalo da análise foi de  $0,289 \mu m$  a  $1408 \mu m$ . Na Tabela 6 e Figura 12 é apresentado a distribuição granulométrica do fíler calcário. Na Figura 13 é exibida a amostra do fíler calcário.

Tabela 6 – Distribuição granulométrica do fíler calcário.

Percentual (%)	Diâmetro das partículas ( $\mu m$ )
10	4,62
20	8,42
30	13,65
40	19,78
50	26,43
60	35,73
70	49,00
80	65,30
90	89,49
95	114,4

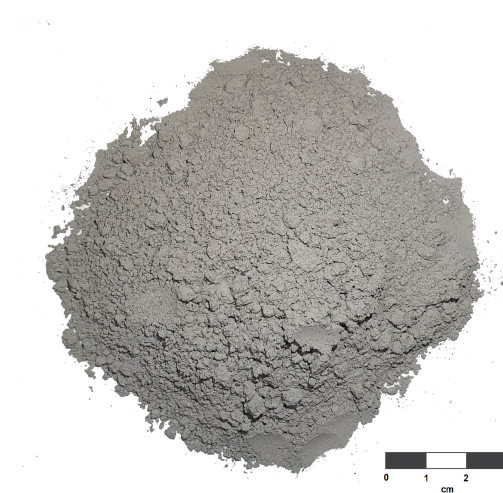
Fonte: Autor, 2022.

Figura 12 – Curva granulométrica do fíler calcário.



Fonte: Autor, 2022.

Figura 13 – Amostra do fíler calcário.



Fonte: Autor, 2021.

#### 3.1.1.4 Sílica ativa

A sílica ativa foi selecionada devido às suas propriedades pozolânicas e por conferir uma maior coesão na mistura, além de diminuir o consumo de cimento Portland. A sílica ativa é a *Elkem® 920 U*, com superfície específica BET entre 150 e 300  $cm^2/g$  e densidade aparente de 0,185  $g/cm^3$ , conforme dados da fabricante (Tabela 7).

Tabela 7 – Características físicas e químicas da sílica.

<b>Caract. químicas</b>	<b>Resultados (%)</b>	<b>Requisitos da NBR 13956-1 (ABNT, 2012)</b>
$SiO_2$	96,24	Mín. 85,00
$Na_2O$	0,22	Máx. 1,50
Perda ao fogo	1,86	Máx. 6,00
<b>Caract. químicas</b>	<b>Resultados (%)</b>	<b>Requisitos da NBR 13956-1 (ABNT, 2012)</b>
Densidade aparente	0,19 $g/cm^3$	Máx. 0,35 $g/cm^3$

Fonte: Elkem®(2018).

A distribuição granulométrica da sílica foi obtida por meio de um granulômetro à laser de marca/modelo Microtrac S3500, sem meio dispersante, com intervalo de análise de 0,289  $\mu m$  a 1408  $\mu m$ . Na Tabela 8 é apresentada a porcentagem de material passante com os respectivos diâmetros e na Figura 14 a porcentagem de material passante acumulado. Na Figura 15 é exibida a amostra da sílica.

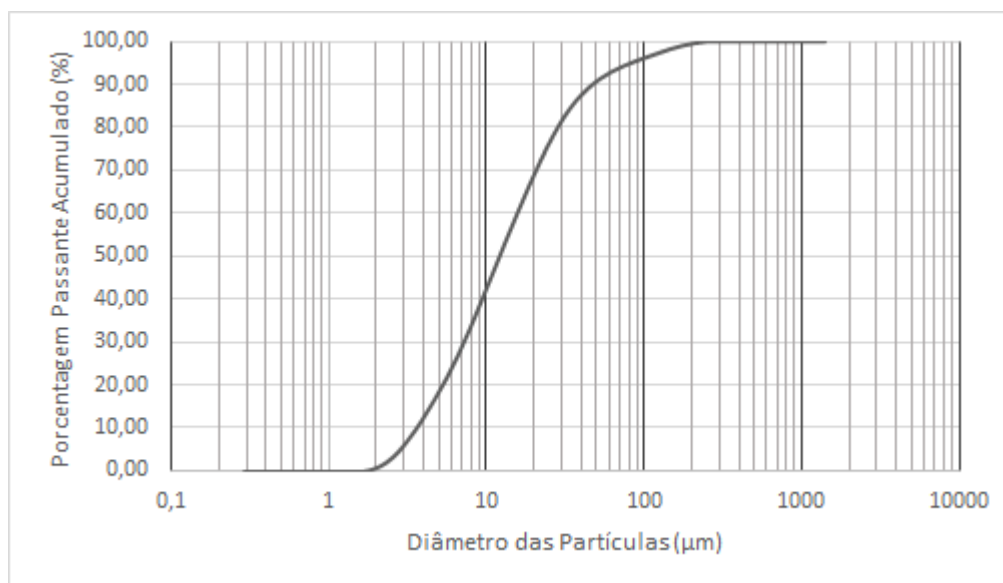
Tabela 8 – Distribuição granulométrica da sílica ativa.

<b>Diâmetro das partículas (<math>\mu m</math>)</b>	<b>Passante (%)</b>
10	3,58
20	5,25
30	7,16
40	9,34
50	12,07
60	15,62
70	20,56
80	28,22
90	46,92
95	82,30

Fonte: Autor, 2022.



Figura 14 – Curva granulométrica da sílica ativa.



Fonte: Autor, 2022.

Figura 15 – Amostra da sílica ativa.



Fonte: Autor, 2021.

### 3.1.1.5 Aditivo superplastificante

A fim de atender os critérios de construtibilidade e extrudabilidade apresentados na seção 2.1.5.1 e para manter uma baixa relação água/cimento mesmo com a adição de fibras, foi proposta a utilização de um superplastificante de terceira geração com base policarboxilato.

O aditivo superplastificante foi empregado com a dosagem recomendada pela NBR 11768 (ABNT, 2019a), entre 0,2% e 5,0% sobre a massa de cimento. Na qual,

os procedimentos para obtenção da dosagem de aditivo da composição padrão serão descritos na seção Seção 3.1.2

O aditivo superplastificante utilizado é o MC-PowerFlow 4001 do fabricante MC-Bauchemie Brasil®. Conforme a NBR 11768 (ABNT, 2019a), o superplastificante foi caracterizado pelo seu teor de sólidos, pH e densidade (Tabela 9).

Tabela 9 – Características físicas e químicas do aditivo MC-PowerFlow 4001.

<b>Aspecto/Cor (visual)</b>	Castanho claro a escuro
<b>Base química</b>	Polímero policarboxilato
<b>pH</b>	4,18
<b>Teor de sólidos (%)</b>	44,70
<b>Densidade (g/ml)</b>	1,06

Fonte: MC-Bauchemie Brasil®(2021).

#### 3.1.1.6 Microfibras de polipropileno

Visto a dificuldade da passagem das fibras pelo bico da extrusora, foi selecionado entre as fibras sintéticas a microfibras de polipropileno de monofilamento (Figura 4), fabricada pela *NeoFibra®* (Tabela 10). Devido a alguns fatores, como: grande fator de forma relacionado ao seu diâmetro muito menor do que o seu comprimento (razão de grande importância para a extrudabilidade do CRF no aparelho de impressão), aumento da coesão do concreto (possibilitará uma maior construtibilidade, com: menor tempo de impressão entre as camadas e menor deformação das camadas) e disponibilidade na região.

Tabela 10 – Características físicas da microfibra de polipropileno.

<b>Comprimento (mm)</b>	6
<b>Densidade relativa</b>	0,91
<b>Deformação na ruptura (%)</b>	25

Fonte: NeoFibra®(2021).

#### 3.1.1.7 Microfibras de aço

Durante a revisão bibliográfica deste trabalho foi observado que os melhores resultados relacionados ao desempenho mecânico foram obtidos pelas fibras de aço (ARUNOTHAYAN *et al.*, 2020). Portanto, foram selecionadas microfibras de aço (Figura 16) fabricadas pela *Bekaert®* (Tabela 11). Conforme a NBR 15530 (ABNT, 2019b) são do Tipo R e Classe I (Fibra de aço reta oriunda de arame trefilado a frio).

Tabela 11 – Características da microfibra de aço.

<b>Propriedades do material</b>	
Característica	Fio brilhante de alto carbono
Resistência à tração	2750 (N/mm <sup>2</sup> )
Módulo de Young	200000 (N/mm <sup>2</sup> )
<b>Características físicas</b>	
Densidade	8,7 g/cm <sup>3</sup>
Comprimento	13 mm
Diâmetro	0,2 mm
Fator de forma	65

Fonte: Bekaert@(2021).

Figura 16 – Microfibra de aço.



Fonte: Bekaert@(2021).

#### 3.1.1.8 Água

A água foi obtida pela rede de abastecimento local disponibilizado pela CASAN, concessionária responsável pelo abastecimento de água no município de Florianópolis - SC.

### 3.1.2 Elaboração da composição do concreto com fibras para impressão 3D

Para o desenvolvimento deste programa experimental foi necessário a elaboração da composição de concreto incluindo as fibras utilizadas, apresentando os requisitos técnicos para impressão. Portanto, o concreto deveria ser imprimível e apresentar uma boa estruturação após a passagem pelo bico da extrusora.

A partir da composição de referência elaborada por trabalhos anteriores que atendiam às características de impressão desejáveis (RUBIN, 2021), as composições utilizadas para este estudo foram desenvolvidas.

#### 3.1.2.1 Composição de referência

A composição de referência foi elaborada em trabalhos anteriores (RUBIN, 2021), a sua produção foi composta por duas etapas: revisão sistemática de litera-

tura e testes preliminares de impressibilidade.

### 3.1.2.1.1 Revisão sistemática de literatura

Na revisão sistemática de literatura observou-se os materiais mais utilizados e suas proporções, além da classe de resistência mecânica. No Quadro 2 é apresentado o levantamento dos materiais e as suas proporções.

Quadro 2 – Materiais e proporções mais utilizadas.

<b>Material</b>	<b>Tipo</b>	<b>Proporção</b>
Cimento	OPC Tipo I	Maioria das composições
Agregado miúdo	Areia de origem quartzosa	Maioria das composições
Adição mineral	Sílica ativa	10-20% das composições
Adição mineral	Cinza volante	20-30% das composições
Fibra	Polipropileno e Aço	32% das composições apresentavam fibras
Aditivo	Superplastificante	82% das composições

Fonte: Rubin (2021).

Em relação às classes de resistência mecânica à compressão, 100% das composições apresentavam resistência superior a 30 MPa aos 28 dias. Quando considerados os concretos produzidos para elementos estruturais 90,9% enquadravam nesta categoria com resistência à compressão superior a 60 MPa aos 28 dias. Com base dos dados coletados Rubin (2021) optou pela produção de concretos com resistência à compressão  $\geq 80$  MPa.

### 3.1.2.1.2 Testes preliminares de impressibilidade

Com base na revisão sistemática de literatura, os materiais foram selecionados, e a composição de referência foi desenvolvida de acordo com a capacidade de operação da impressora 3D. Duas etapas foram realizadas no teste preliminar, primeiramente foram definidos o consumo de areia na composição do concreto. Segunda etapa consistiu na determinação do teor de fíler calcário e os ajustes da velocidade de impressão (RUBIN, 2021). A composição de referência obtida com base nas etapas anteriores é apresentada na Tabela 12.

Tabela 12 – Composição de referência.

<b>Cimento</b>	<b>Areia</b>	<b>Sílica ativa</b>	<b>Aditivo super.</b>	<b>Água</b>
1	2,15	0,15	1% de Cim.	0,35

Fonte: Rubin (2021).

### 3.1.2.2 Elaboração de novas composições

A elaboração das composições para este trabalho com e sem a adição das fibras, apresentam como ponto de partida a composição de referência desenvolvido por Rubin (2021). Duas etapas foram realizadas para a sua produção: ajuste da composição de referência e adição das fibras.

#### 3.1.2.2.1 Ajustes da composição de referência

Diante da necessidade de se obter misturas com incorporação de fibras que atendiam os critérios de extrudabilidade e construtibilidade, a composição de referência foi adaptada.

Para definir a composição padrão sem fibras, foram realizados teste com variação da relação água/cimento e do teor de aditivo superplastificante com base na composição de referência. Assumindo algumas variações das dosagens, foram produzidas as misturas. A primeira análise foi visual, observando: a homogeneidade, a coesão e a exsudação. As misturas que apresentaram bom aspecto visual foram submetidas ao teste preliminar de impressão, observando agora a extrudabilidade e construtibilidade do material no equipamento de impressão.

A mistura que atendeu as duas etapas, visual e de impressão, foi adotada como a composição padrão sem fibras (Tabela 13).

Tabela 13 – Composição padrão sem fibras.

<b>Cimento</b>	<b>Areia</b>	<b>Sílica ativa</b>	<b>Aditivo super.</b>	<b>Água</b>
1	2,15	0,15	0,8% de Cim.	0,4

Fonte: Autor, 2022.

Com a definição da composição padrão sem fibras, foram realizados os seguintes ensaios no estado fresco: massa específica (NBR 13278 (ABNT, 2005a)) e índice de consistência (NBR 13276 (ABNT, 2016)).

As misturas com incorporação de fibras foram submetidas novamente ao procedimento anterior (visual e teste de impressão), porém variando somente o teor de aditivo superplastificante.

#### 3.1.2.2.2 Adição das fibras na composição padrão

Como ponto de partida pela composição padrão sem fibras, duas etapas foram realizadas para a elaboração das composições com diferentes teores de fibras.

1. A partir da bibliografia existente, foram selecionados os teores de cada tipo de fibra;

2. Após a seleção dos teores das fibras foi realizada a análise visual da mistura e o teste de impressão.

Os teores de fibras foram selecionados com base nas seguintes bibliografias:

- Microfibras de polipropileno: Nematollahi *et al.* (2018a) selecionaram os teores de 0,25%; 0,5%; 0,75% e 1%. No entanto, para teores acima de 0,75% os autores obtiveram uma mistura bastante seca e rígida, impropria para utilização na manufatura aditiva. Para atender os critérios de extrudabilidade e construtibilidade das misturas foram incorporados progressivamente os seguintes teores de fibras por volume: 0,1% e 0,2%.
- Microfibras de aço: Singh *et al.* (2022) selecionaram as mesmas microfibras de aço utilizadas por este trabalho com os seguintes teores por volume: 0,3%, 0,6%, 1% e 1,3%. Todavia, para os teores acima de 0,6% os autores obtiveram com 15 minutos uma diminuição acentuada do índice de consistência. A fim de atender os requisitos de extrudabilidade e construtibilidade das misturas foram incorporadas progressivamente os seguintes teores de fibras de aço por volume: 0,1% e 0,2%.

Com base na análise dessas bibliografias foram realizados ensaios com teores variados de microfibras de polipropileno e de aço: 0,1%, 0,2%, 0,25% e 0,5%. No entanto, teores iguais ou superiores a 0,25% de microfibras não atenderam aos critérios de capacidade de impressão.

Portanto, na Tabela 14 é apresentado um resumo das microfibras utilizadas com os respectivos teores selecionados, na qual atenderam aos critérios de extrudabilidade e de construtibilidade.

Tabela 14 – Teores das fibras utilizadas.

<b>Tipo</b>	<b>Teor (% volume de sólidos)</b>	<b>Comprimento (mm)</b>
Microfibra polipropileno	0,1 e 0,2	12
Microfibra de aço	0,1 e 0,2	13

Fonte: Autor, 2022.

Após a determinação dos teores das fibras, foram selecionadas algumas dosagens para testes, variando o teor de aditivo para cada teor de fibra.

Seguindo o mesmo procedimento para a elaboração da composição padrão sem fibras, foram observados em um primeiro momento os aspectos visuais da mistura (homogeneidade, coesão e exsudação) e posteriormente foram realizados os testes de impressão.

Assim, foram selecionadas as seguintes composições para cada teor de fibra, variando somente o teor de aditivos (Tabela 15).

Tabela 15 – Composição unitária em massa para cada teor de fibras.

<b>Tipo e teor de fibras (Volume de sólidos)</b>	<b>Cimento</b>	<b>Areia</b>	<b>Sílica</b>	<b>Aditivo superplastificante (Massa de cimento)</b>	<b>Água</b>
(0,1%) Poli.	1	2,15	0,15	1%	0,4
(0,2%) Poli.	1	2,15	0,15	1,1%	0,4
(0,1%) Aço	1	2,15	0,15	0,9%	0,4
(0,2%) Aço	1	2,15	0,15	0,9%	0,4

Fonte: Autor, 2022.

Para cada composição foram realizados os seguintes ensaios no estado fresco: massa específica (NBR 13278 (ABNT, 2005a)) e índice de consistência (NBR 13276 (ABNT, 2016)).

## 3.2 PRODUÇÃO E ENSAIOS

Nesta seção, serão apresentados os procedimentos de mistura, de impressão e de cura. A descrição de um novo processo para a melhoria da união entre as camadas. Além dos ensaios adotados para a avaliação das propriedades no estado fresco e endurecido.

### 3.2.1 Procedimentos de mistura

Para cada procedimento de mistura foram produzidas 4 peças de concreto com duas camadas, uma sobreposta à outra (Figura 21). Para minimizar as possíveis diferenças existentes entre os diferentes lotes de produção, o mesmo procedimento foi realizado para todas as amostras.

O misturador utilizado apresenta capacidade de 15 litros e velocidade de mistura de 60 *rpm*, em que foram produzidos aproximadamente 7 litros de material por lote (Figura 17).

Figura 17 – Misturador utilizado.



Fonte: Autor, 2022.

O seguinte procedimento de mistura foi realizado: água com superplastificante e cimento são adicionados e misturados durante 30 segundos; após os 30 segundos, metade do material sólido é adicionado e misturado por mais 30 segundos; após o primeiro minuto de mistura é adicionado a segunda parte do material sólido; as fibras são adicionadas entre 90 segundos (1 minuto e 30 segundos) e o segundo minuto; todo material é misturado até atingir 7 minutos desde o início do procedimento.

### 3.2.2 Procedimentos de cura

Todos os corpos de prova (moldados e impressos), após a sua produção, foram armazenados em local protegido de intempéries e vibrações, com  $23 \pm 1^\circ C$  de temperatura e aproximadamente 70% de umidade relativa do ar. Para simular as condições reais de uso das peças de concreto de impressão 3D, as amostras impressas foram submetidas à cura seca (exposto ao ar) durante o período de 28 dias (Figura 18).

Figura 18 – Cura das amostras impressas.



Fonte: Autor, 2022.



Para os corpos de prova moldados, após o período de 24 horas de cura inicial nas formas, as amostras foram desformadas e armazenadas na câmara de cura (100% de umidade relativa do ar) durante 27 dias, totalizando 28 dias de cura. Para os corpos de prova impressos, depois da impressão, as amostras foram mantidas durante um período de 24 horas no gabarito metálico de impressão. Após este período foram retiradas e armazenadas para a cura seca durante 27 dias, totalizando 28 dias de cura.

### 3.2.3 Procedimentos de impressão e extração dos corpos de prova

A avaliação das propriedades no estado endurecido das amostras de concreto de impressão 3D com fibras foram investigadas por meio da extração de corpos de prova dos elementos impressos. O equipamento de impressão utilizado é uma extrusora desenvolvida por Rubin (2021). Na Figura 19 é apresentado o equipamento utilizado para impressão.

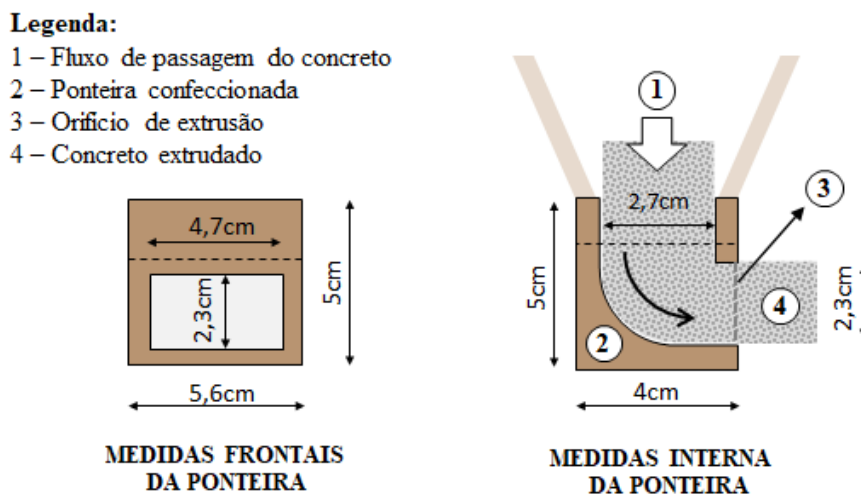
Figura 19 – Equipamento utilizado para impressão.



Fonte: Autor, 2021.

Rubin (2021) realizou alguns ajustes no equipamento de impressão, principalmente em relação à geometria do bico de extrusão. Durante a realização dos testes, o bico de extrusão que apresentou melhor desempenho foi o de saída retangular com  $4,7 \times 2,3$  cm (Figura 20), com deposição horizontal. Essa geometria permite que o depósito das camadas ocorra pela ação da gravidade, sem provocar pressão na camada inferior.

Figura 20 – Dimensões do bico de extrusão do equipamento de impressão.



Fonte: Rubin (2021).

O tempo de deposição entre a primeira e a segunda camada foi de 2 minutos, tempo necessário para execução do procedimento no equipamento utilizado. A velocidade de deposição das camadas foi em média de 3,41 *m/min*.

As amostras impressas apresentam 50 *cm* de comprimento, 5 *cm* de largura e aproximadamente 5 *cm* de altura em duas camadas de 2,5 *cm*. Após a produção das paredes e do período de cura foram extraídos corpos de prova cúbicos com 5 *cm* de lado para serem realizados os ensaios no estado endurecido. Na Figura 21 e Figura 22 são apresentados a amostra impressa e o corpo de prova cúbico após a sua extração.

Figura 21 – Amostra obtida na impressora.



Fonte: Autor, 2021.

Figura 22 – Amostra prismática após sua extração.



Fonte: Autor, 2021.

### 3.2.4 Procedimento para a melhoria da união entre as camadas

Na bibliografia existente, é observado que uma das características da adição das fibras é a diminuição da união entre as camadas. Primeiro, pela maior coesão da mistura e a menor deformação das camadas. Segundo, pela maior adsorção de água pelas fibras que promovem uma superfície mais seca, reduzindo a trabalhabilidade e impedindo o desenvolvimento da ligação entre as camadas (NEMATOLLAHI *et al.*, 2018b, 2018a; SANJAYAN *et al.*, 2018).

Portanto, para este programa experimental foi proposto o desenvolvimento de um novo procedimento para a melhoria da união entre as camadas das amostras de concreto com fibras de manufatura aditiva.

#### 3.2.4.1 Aplicação de *spray* de água na superfície das camadas

O método consiste no borrifamento de água por meio da utilização de um pulverizador manual com meio litro de capacidade (Figura 23). Após a impressão da primeira camada, 8 borrifamentos de água foram aplicados uniformemente sobre a superfície. Sendo aplicadas em 2 regiões diferentes: 4 nas extremidades e 4 nas regiões centrais da superfície da camada.

Figura 23 – Pulverizador utilizado no procedimento de *spray* de água.



Fonte: Vonder, 2021.

Após o borrifamento de água, a segunda camada foi depositada dentro do intervalo de 2 minutos. O desempenho da aderência intercamadas das amostras com e sem borrifamento foram analisadas pro meio dos procedimentos descritos no ensaio de aderência intercamadas na Seção 3.2.6.3.

A fim de permitir a replicação deste procedimento em trabalhos futuros para avaliar a quantidade de água aplicada sobre a superfície da amostra em cada procedimento de borrifamento, um experimento foi realizado. O ensaio consistiu em 8 borrifamentos de água sobre uma folha plástica (20 x 20 cm), após a sua aplicação foi verificada a massa de água existente sobre a superfície. O ensaio foi replicado 10 vezes, obtendo-se a média de 4,7 g de água por procedimento, portanto 85,11 cm<sup>2</sup>/g de água.

### 3.2.5 Ensaios no estado fresco

#### 3.2.5.1 Índice de consistência e massa específica

As diferentes composições adotadas para este estudo foram caracterizadas em seu estado fresco por meio da determinação do índice de consistência (NBR 13276 (ABNT, 2016)), e da determinação da massa específica (NBR 13278 (ABNT, 2005a)) (Figura 24 e Figura 25).

Figura 24 – Ensaio para determinação do índice de consistência.



Fonte: Autor, 2022.

Figura 25 – Equipamento para determinação da massa específica.



Fonte: Autor, 2022.

#### 3.2.5.2 Avaliação da construtibilidade

Durante o processo de impressão vários aspectos do estado fresco do material devem ser levados em consideração. Inicialmente, o concreto deve ser bombeado pela extrusora até o bico (extrudabilidade). Logo após passar pelo bico da extrusora, os filamentos devem suportar o seu peso próprio e das camadas subsequentes (construtibilidade), sem apresentar grandes deformações verticais. A necessidade de avaliar

a construtibilidade é fundamental, porém poucos são os métodos desenvolvidos até o presente momento.

Com base na metodologia já desenvolvida por outros autores, este trabalho busca aprimorar o método de avaliação da construtibilidade com a adaptação do teste de estabilidade de forma (KAZEMIAN *et al.*, 2017).

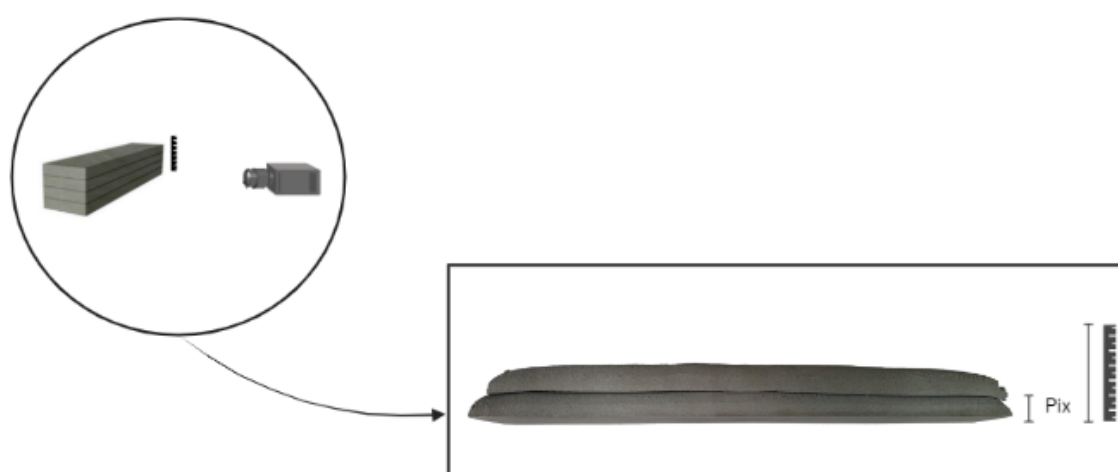
### 3.2.5.2.1 Teste de estabilidade de forma das camadas

O teste de estabilidade de forma é uma adaptação do ensaio realizado anteriormente por Kazemian *et al.* (2017). O ensaio consiste na captura das deformações verticais presentes nas amostras com a utilização de uma câmera de baixo custo, visando obter uma avaliação quantitativa da estabilidade de forma das camadas de concreto produzidas por impressão 3D.

O ensaio não-destrutivo é composto pelo posicionamento de uma câmera na posição frontal das camadas impressas e de um objeto com dimensões conhecidas ao lado das camadas. A partir da captura das imagens, antes e depois da impressão da segunda camada, foi analisada a variação das deformações verticais com auxílio de um *software* computacional de imagens ImageJ®.

A extração da variação da deformação ocorre por meio da contagem do número de *pixels* do objeto de referência. Como o objeto de referência apresenta dimensões definidas, o número de *pixels* das camadas impressas fornece proporcionalmente as suas dimensões (Figura 26, Figura 27 e Figura 28).

Figura 26 – Ilustração do teste de estabilidade de forma.



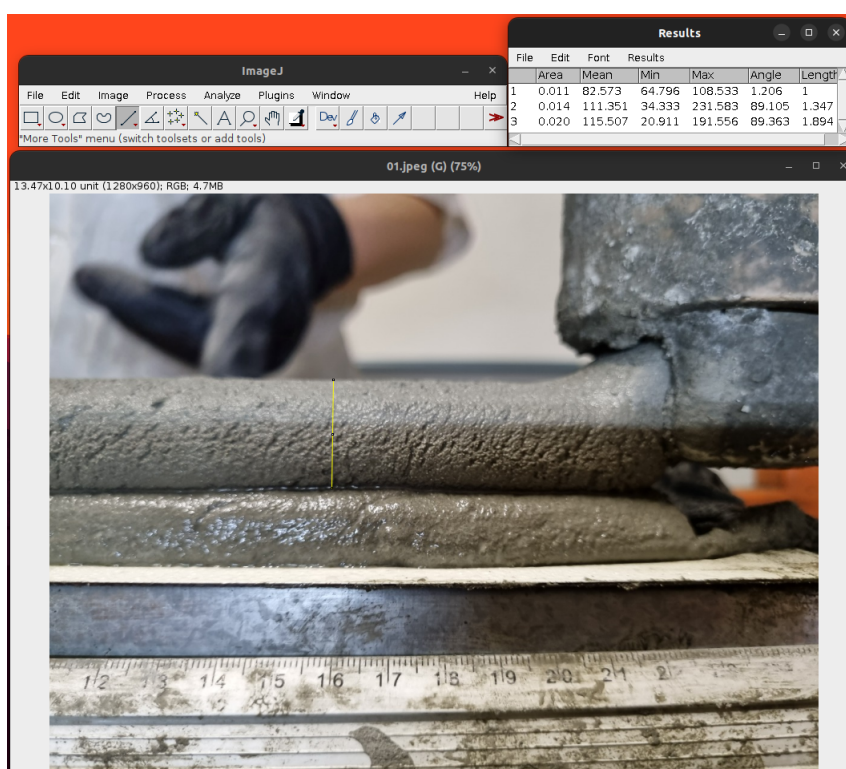
Fonte: Autor, 2022.

Figura 27 – Posicionamento da câmera para o teste de estabilidade de forma.



Fonte: Autor, 2022.

Figura 28 – Avaliação da altura das camadas com auxílio do *software* computacional de imagens ImageJ®.



Fonte: Autor, 2022.

Neste trabalho foram impressas duas camadas, uma sobreposta à outra. O principal objetivo deste ensaio é na avaliação da variação das deformações verticais

das camadas. Portanto, o teste foi realizado em todas as camadas impressas, com e sem fibras.

O equipamento utilizado foi uma câmera de baixo custo modelo Samsung S21 FE®, na qual foi aplicado foco manual fixo configurado antes do início do ensaio.

### **3.2.6 Ensaios no estado endurecido**

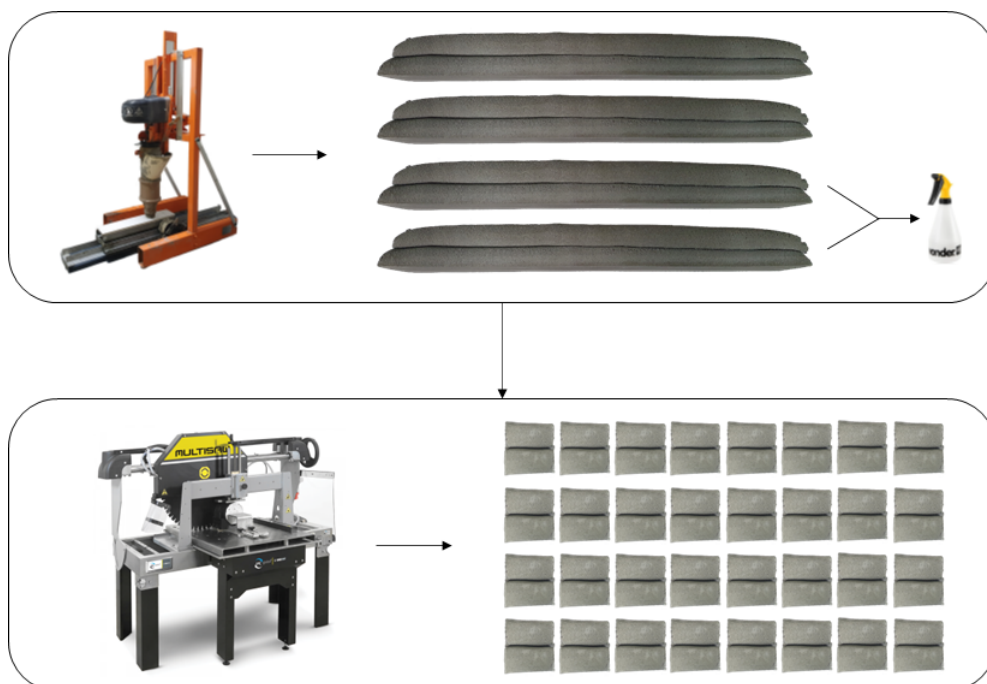
Nesta seção serão apresentados inicialmente um resumo dos corpos de prova produzidos. Em seguida serão discutidos os procedimentos de ensaios para as amostras moldadas e impressas.

#### **3.2.6.1 Amostras impressas produzidas para o programa experimental**

Para o desenvolvimento deste projeto experimental, foram produzidas, para cada lote de impressão, 4 amostras. Para cada composição, foram realizadas duas impressões, sendo uma sem e outra com aplicação de borrifador de água.

Devido à necessidade da retirada das rebarbas das extremidades, para cada amostra obtida na impressora foram extraídos 8 corpos de prova cúbicos com 5 cm de lado. Portanto, para cada composição foram produzidas 64 amostras cúbicas, 32 sem borrifamento de água entre as camadas e 32 com borrifamento. Das 32 amostras destinadas para o ensaio de aderência intercamadas: 16 são amostras com borrifamento de água e 16 são amostras que não sofreram esse procedimento. Na Figura 29 é apresentada a produção e extração das amostras impressas.

Figura 29 – Produção e extração das amostras impressas.



Fonte: Controls (2022) e Autor, 2022.

Um resumo com os corpos de prova que foram produzidos para este programa experimental está representado no Quadro 3.



Quadro 3 – Resumo do número de amostras impressas para os ensaios no estado endurecido.

<b>Tipo</b>	<b>Amostras Impressas</b>	<b>Amostras Extraídas</b>	<b>Amostras Resistência à Compressão</b>	<b>Amostras Aderência Intercamadas</b>
Ref. Sem Spray	4	32	16	16
Ref. Com Spray	4	32	16	16
(0,1%) Poli. Sem Spray	4	32	16	16
(0,2%) Poli. Sem Spray	4	32	16	16
(0,1%) Poli. Com Spray	4	32	16	16
(0,2%) Poli. Com Spray	4	32	16	16
(0,1%) Aço Sem Spray	4	32	16	16
(0,2%) Aço Sem Spray	4	32	16	16
(0,1%) Aço Com Spray	4	32	16	16
(0,2%) Aço Com Spray	4	32	16	16

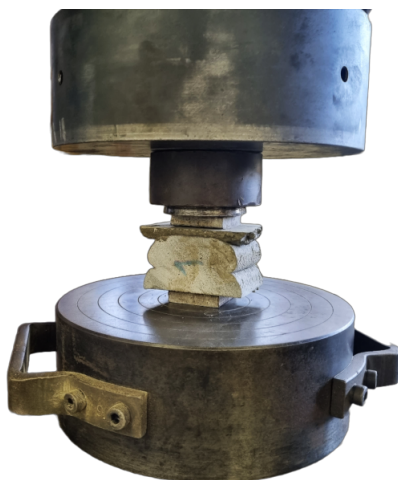
Fonte: Autor, 2022.

### 3.2.6.2 Resistência à compressão das amostras impressas

A fim de avaliar o desempenho mecânico das amostras impressas com fibras e sem fibras, o ensaio de resistência à compressão foi realizado após um período de cura de 28 dias. A prensa hidráulica utilizada é do modelo UH-X 2000 kN (Shimadzu®), seguindo as especificações da NBR 13279 (ABNT, 2005b) com algumas adaptações para as amostras impressas.

Para cada composição foram ensaiados 16 elementos cúbicos com 5 cm de lado, totalizando 160 ensaios de resistência à compressão. Para cada grupo de 8 elementos (1 elemento impresso), as seguintes posições de ensaio foram realizadas: 4 amostras foram ensaiados na posição horizontal (carregamento à compressão perpendicular ao encontro das camadas - Figura 30) e 4 amostras foram ensaiadas na posição vertical (carregamento à compressão paralelo ao encontro das camadas - Figura 31).

Figura 30 – Ensaio à compressão de amostra impressa - posição horizontal.



Fonte: Autor, 2022.

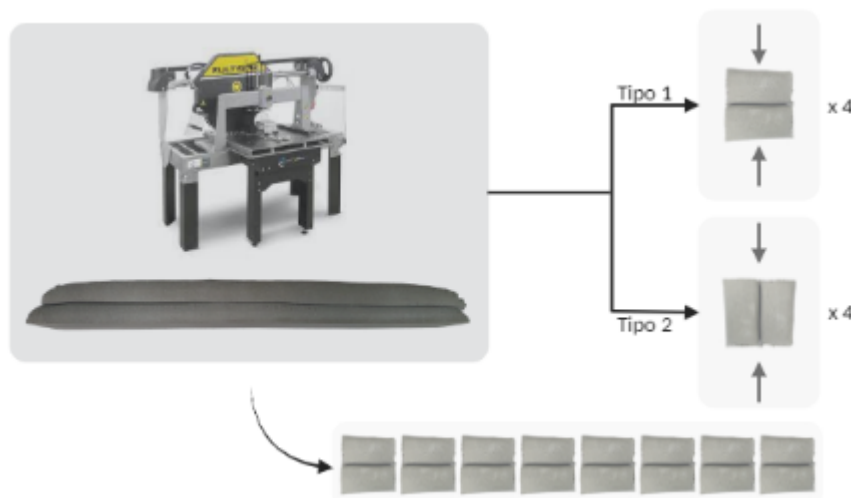
Figura 31 – Ensaio à compressão de amostra impressa - posição vertical.



Fonte: Autor, 2022.

Na Figura 32 é apresentada a ilustração do processo para a extração dos corpos de prova e as direções de ensaios, sendo do tipo 1 com a posição de ensaio horizontal e do tipo 2 na posição vertical.

Figura 32 – Ilustração da extração e posição de ensaio das amostras impressas extraídas.



Fonte: Controls (2022) e Autor, 2022.

Antes da realização do teste foi efetuada regularização da superfície das amostras, com pasta de cimento Portland e água (espessura de aproximadamente 0,5 cm), em ambas as posições (paralelo e perpendicular). Essa regularização deve ser efetuada diante das irregularidades da superfície das amostras de manufatura aditiva (PADILHA, 2020).

As amostras foram posicionadas no centro da prensa, em contato com dois pratos metálicos com 4x4 cm de dimensão. Com base na NBR 13279 (ABNT, 2005b), o dispositivo foi configurado para uma velocidade de ensaio de 500 N/s até a ruptura da amostra.

O cálculo para a obtenção da resistência à compressão está apresentado na Equação (4).

$$R_c = \frac{F_c}{1600} \quad (4)$$

Em que,

- $R_c$  é a resistência à compressão (MPa);
- $F_c$  é a carga máxima aplicada (N);
- 1600 é a área da seção quadrada do dispositivo de carga 40 mm x 40 mm, em milímetros quadrados.

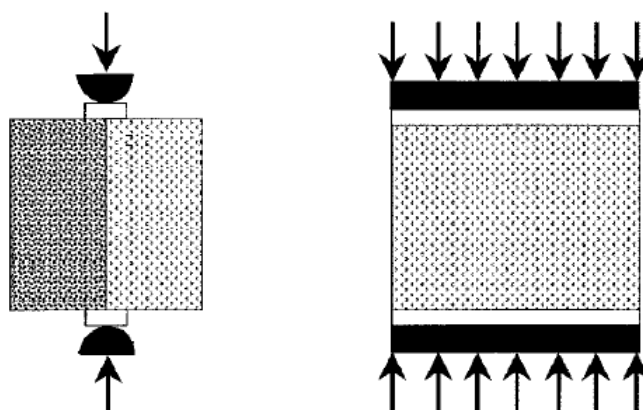
### 3.2.6.3 Aderência intercamadas

Neste trabalho optou-se pelo uso do teste de partição de prisma (*Prism Splitting Test*) para a avaliação da aderência entre as camadas. Como apresentado na

Seção 2.3.5.2.2, diferentemente do teste de tração por divisão, esse ensaio não apresenta influência do material adesivo utilizado para a colagem das superfícies das amostras (WENG *et al.*, 2021).

O ensaio consiste no posicionamento de um prisma na máquina de teste, de modo que o plano de ligação entre as camadas estivessem posicionadas sobre uma linha de compressão (Figura 33). O procedimento do teste é preconizado pela ASTM C 496 (ASTM, 2017), porém com a utilização de amostras cúbicas ao invés das cilíndricas. Li *et al.* (1999) comprovaram que tanto amostras cilíndricas quanto prismáticas produziram tensão de tração uniforme na maior parte do plano de divisão.

Figura 33 – Teste de partição de prisma.



Fonte: Li *et al.* (1999), Adaptado.

Após um período de 28 dias de cura, o teste foi executado com uma velocidade de 850 N/s até a ruptura da amostra. Para cada composição foram realizados 16 testes, em que a sua resistência à tração interfacial foi obtida pela Equação (5).

$$F_t = \frac{2P_u}{\pi A} \quad (5)$$

Em que,

- $F_t$  é a resistência à tração interfacial (MPa);
- $P_u$  é a carga final (N);
- $A$  é a área de interface ( $m^2$ ).

Antes do início do ensaio, a área de interface das amostras foi verificada por meio da utilização de um paquímetro. Para a sua realização, duas chaves do tipo allen com 6 mm foram posicionadas na parte inferior e superior, possibilitando uma distribuição uniforme da carga (Figura 34 e Figura 35). A prensa utilizada é do modelo 5589 (Instron®).

Figura 34 – Ensaio de aderência intercamadas.



Fonte: Autor, 2022.

Figura 35 – Camadas após ruptura do ensaio de aderência intercamadas.



Fonte: Autor, 2022.

#### 3.2.6.4 Resistência à compressão e à tração na flexão das amostras moldadas

Para a verificação da resistência à compressão e à tração na flexão foram confeccionados corpos de prova prismáticos (4 x 4 x 16 cm). Os procedimentos de ensaios são estabelecidos pela NBR 13279 (ABNT, 2005b).

Após a preparação do concreto, foram introduzidos nos moldes fixos na mesa de adensamento o concreto fresco seguindo os procedimentos descritos pela NBR 13279 (ABNT, 2005b). Depois de um período de cura de 28 dias (27 dias na câmara úmida), os ensaios de resistência à compressão e à tração foram executados. Sendo produzidas 21 amostras para cada composição. No Quadro 4 é apresentado um resumo dos corpos de prova produzidos para esta etapa.

Quadro 4 – Resumo do número de amostras moldadas para os ensaios no estado endurecido.

Tipo	Número de amostras	Resistência à tração na flexão	Resistência à compressão
Ref.	21	21	42
(0,1%) Poli.	21	21	42
(0,2%) Poli.	21	21	42
(0,1%) Aço	21	21	42
(0,2%) Aço	21	21	42

Fonte: Autor, 2022.

#### 3.2.6.4.1 Resistência à tração na flexão para as amostras moldadas

Os ensaios das amostras moldadas foram realizados na prensa de modelo 1118220 (SOLOTEST®). Os corpos de prova foram posicionados a 90° da face de moldagem, em que o equipamento foi configurado em uma velocidade de ensaio de  $(50 \pm 10) N/s$  até a ruptura da amostra (Figura 36), sendo avaliadas 21 amostras para cada composição. Na Equação (6) está representado o cálculo para a obtenção da resistência à tração na flexão.

$$R_f = \frac{1,5F_f L}{40^3} \quad (6)$$

Em que,

- $R_f$  é a resistência à tração na flexão (MPa);
- $F_f$  é a carga máxima aplicada verticalmente no centro do prisma (N);
- $L$  é a distância entre os suportes (mm).

Figura 36 – Ensaio de resistência à tração na flexão - amostra moldada.



Fonte: Autor, 2022.

### 3.2.6.4.2 Resistência à compressão axial para as amostras moldadas

Após a execução do ensaio de resistência à tração na flexão, ambas as partes da amostra rompida foram utilizadas para a avaliação da resistência à compressão axial, totalizando 42 amostras para cada composição. O teste foi executado na prensa de modelo UH-X 2000 kN (Shimadzu®), com uma velocidade de ensaio de  $(500 \pm 10) \text{ N/s}$  (Figura 37). Na Equação (7) está representado o cálculo para a obtenção da resistência à compressão axial para as amostras moldadas.

$$R_c = \frac{F_c}{1600} \quad (7)$$

Em que,

- $R_c$  é a resistência à compressão (MPa);
- $F_c$  é a carga máxima aplicada (N);
- 1600 é a área da seção quadrada do dispositivo de carga 40 mm x 40 mm, em milímetros quadrados.

Figura 37 – Ensaio de resistência à compressão axial - amostra moldada.



Fonte: Autor, 2022.

### 3.2.7 Resumo do programa experimental

No Quadro 5 é apresentado um resumo dos ensaios no estado fresco e endurecido, com: o número de amostras analisadas, a idade de cura e a norma de referência.

Quadro 5 – Resumo do programa experimental.

<b>Ensaio</b>	<b>Número de amostras</b>	<b>Idade (dias)</b>	<b>Norma de ref.</b>
Teste de estabilidade de forma das camadas	Todas as amostras impressas	Estado fresco	-
Índice de consistência	5	Estado fresco	NBR 13276 (ABNT, 2016)
Massa específica	5	Estado fresco	NBR 13278 (ABNT, 2005a)
Resistência à compressão (amostras impressas)	160	28	NBR 13279 (ABNT, 2005b)
Aderência intercamadas	160	28	ASTM C 496 (ASTM, 2017)
Resistência à tração na flexão (amostras moldadas)	105	28	NBR 13279 (ABNT, 2005b)
Resistência à compressão (amostras moldadas)	210	28	NBR 13279 (ABNT, 2005b)

Fonte: Autor, 2022.

### 3.2.7.1 Nomenclaturas

A fim de facilitar a leitura, os diferentes grupos de concretos produzidos foram designados por diferentes nomenclaturas. As seguintes abreviações foram adotadas: as composições de referência são designados como "Ref.", para as composições com incorporação de fibras foram designados "Aço" para as amostras com microfibras de aço e "Poli." para as com microfibras de polipropileno. O teor de fibras aplicado na amostra é representado antes da abreviação do tipo de fibra, sendo "0,1%" para o teor de 0,1% de fibra e "0,2%" para 0,2%. Em relação à aplicação ou não de *spray* de água: a nomenclatura "S/Spray" são para as amostras que não obtiveram a aplicação do método e "C/Spray" para as amostras em que ocorreu a aplicação do borrifamento de água. Exemplificando, a composição "(0,1%) Aço S/Spray" é a composição com incorporação de 0,1% de microfibra de aço sem a aplicação de borrifamento de água sobre a primeira camada.



## 4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

### 4.1 ESTADO FRESCO

Para avaliar o estado fresco foram investigados o índice de consistência e a massa específica para cada composição desenvolvida (Seção 3.2.5.1), além da estabilidade de forma das camadas (Seção 3.2.5.2.1).

#### 4.1.1 Determinação do índice de consistência e massa específica

Neste estudo foi adotada a composição padrão como ponto de partida para a produção das composições com fibras, variando somente o teor de aditivo superplastificante e de fibras. Para garantir a impressibilidade das amostras com suas diferentes composições, sem que ocorresse o entupimento da extrusora, foram avaliados o índice de consistência de cada composição produzida.

Como observado em trabalhos anteriores que utilizaram o mesmo equipamento de impressão (RUBIN, 2021), o intervalo de índice de consistência que permite a impressão dos elementos é de  $(23 \pm 1)$  cm. Esse limite indica que o material não provoca entupimento da extrusora e não apresenta uma fluidez excessiva para amostras de concreto sem fibras.

Os ensaios de índice de consistência e de massa específica das composições foram realizados após a validação da impressibilidade do material, durante a produção dos corpos de prova moldados.

Para o índice de consistência foram realizadas três medições e calculada a sua média. Já a massa específica foram verificadas uma vez para cada amostra (NBR 13276 (ABNT, 2016) e NBR 13278 (ABNT, 2005a)).

Na Tabela 16 são apresentados os resultados do índice de consistência e da massa específica para cada composição utilizada.

Tabela 16 – Caracterização das composições no estado fresco.

Composição	Índice de consistência (cm)		Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )
	Resultado médio	Desvio padrão	Resultado
Referência	27,91	0,7	2840
(0,1%) Poli.	28,54	0,86	2790
(0,2%) Poli.	28,67	0,46	2800
(0,1%) Aço	27,67	0,06	2802
(0,2%) Aço	29,3	0,26	2800

Fonte: Autor, 2022.

O índice de consistência apresentado pelas amostras é superior ao estipulado em outros trabalhos desenvolvidos com o mesmo equipamento  $(23 \pm 1)$  cm (RUBIN, 2021). Essa maior fluidez foi necessária, já que foram incorporadas fibras para as

composições desenvolvidos por este estudo. Em testes de impressão realizados neste trabalho, uma menor fluidez das amostras com fibras causavam o entupimento do equipamento, inviabilizando a sua produção.

Em relação à massa específica, os resultados foram próximos à  $2800 \text{ kg/m}^3$ .

#### 4.1.2 Teste de estabilidade de forma das camadas

Em todas as impressões foram capturadas imagens na posição frontal dos corpos de prova, em intervalos de 10 segundos. A partir destas imagens foram obtidas as alturas médias das camadas. Primeiramente, foi avaliada a altura da primeira camada depositada. Em seguida, após o intervalo de 2 minutos, a segunda camada foi depositada e então foi avaliada a altura da primeira e da segunda camada.

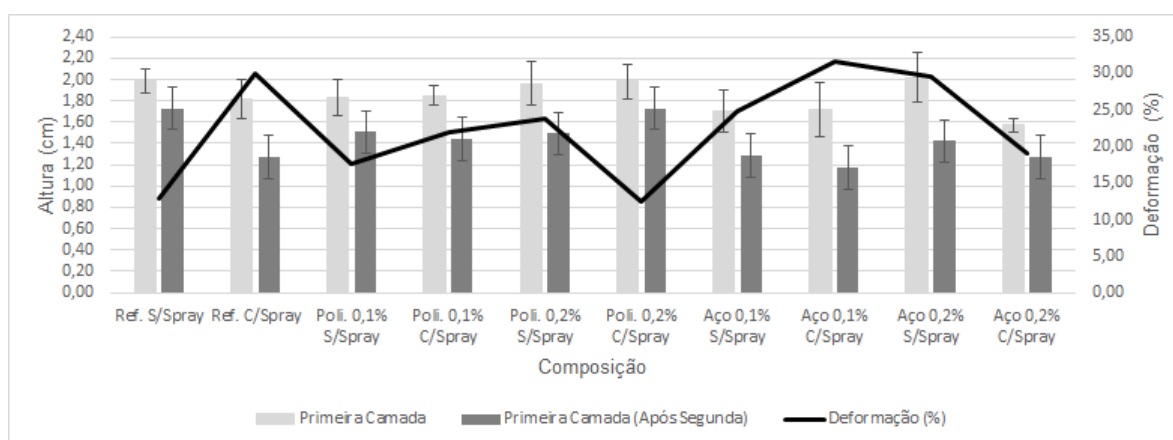
Os resultados obtidos em relação à altura da primeira camada antes e após a deposição da segunda camada são apresentados na Tabela 17, com o desvio padrão e a diferença percentual das alturas.

Tabela 17 – Altura da primeira camada antes e após o depósito da segunda camada.

Composição	Primeira camada		Primeira camada (Após o depósito da segunda)		Deformação (%)
	Altura (cm)	Desvio padrão (cm)	Altura (cm)	Desvio padrão (cm)	
Ref. S/Spray	1,98	0,11	1,73	0,28	12,91
Ref. C/Spray	1,81	0,18	1,27	0,18	29,9
(0,1%) Poli. S/Spray	1,83	0,18	1,51	0,25	17,69
(0,1%) Poli. C/Spray	1,85	0,09	1,44	0,35	21,86
(0,2%) Poli. S/Spray	1,96	0,21	1,49	0,39	23,9
(0,2%) Poli. C/Spray	1,98	0,16	1,73	0,4	12,56
(0,1%) Aço S/Spray	1,71	0,2	1,29	0,37	24,85
(0,1%) Aço C/Spray	1,72	0,25	1,17	0,14	31,73
(0,2%) Aço S/Spray	2,02	0,23	1,42	0,28	29,52
(0,2%) Aço C/Spray	1,57	0,06	1,27	0,09	19,03

Fonte: Autor, 2022.

Figura 38 – Altura da primeira camada antes e após o depósito da segunda camada com suas respectivas deformações.



Fonte: Autor, 2022.

Na análise da altura das camadas (Figura 38) é perceptível em todas as amostras uma diminuição significativa da altura da primeira camada após a deposição da segunda, estando esta diferença entre 12,91% e 31,73% e esse efeito ocorre devido ao peso próprio da segunda camada sobre a primeira. Resultados semelhantes são encontrados por Kazemian *et al.* (2017).

Em relação à análise da altura entre as diferentes composições, duas variáveis foram levadas em consideração: a aplicação ou não de *spray* de água na superfície da primeira camada e a incorporação ou não de fibras em diferentes teores.

Para as composições de referência sem fibras a aplicação do *spray* de água ocasionou uma diferença de 12,91% para 29,9%, na altura da primeira camada. No entanto, observa-se que para as amostras com fibras a aplicação do *spray* não foi o principal fator que ocasionou a diferença da altura, já que para algumas amostras ocorreu a diminuição da altura (deformação das camadas) após a aplicação do *spray* (0,2% Poli. e 0,2% Aço) e para outras um aumento (0,1% Poli. e 0,1% Aço).

Em relação à incorporação de fibras, não foi perceptível uma melhoria da estabilidade de forma na primeira camada. A principal hipótese é a de que a maior fluidez ocasionada pelo maior teor de aditivo superplastificante impediu uma melhor retenção de forma do material (construtibilidade), interferindo na velocidade de impressão. O maior teor de aditivo utilizado para as amostras com fibras foi aplicado para atender aos critérios de extrudabilidade, a fim de manter a fluidez do material no equipamento utilizado.

Para todos foi realizada a análise de variância (ANOVA) e o teste de Tukey por meio do *software Past Program* com 5% de significância. Os resultados obtidos estão apresentados no Apêndice A. Em relação à primeira camada, somente foi observada diferença significativa entre a composição de referência sem *spray* e as composições

com 0,2% Aço com *spray* e 0,2% Aço sem *spray*. Já em relação à altura da primeira camada, após o depósito da segunda não foi observada nenhuma diferença significativa entre as amostras analisadas. Portanto, não foi identificado fator predominante na variabilidade dos resultados. No entanto, as diferenças das deformações foram significativas no ponto de vista tecnológico.

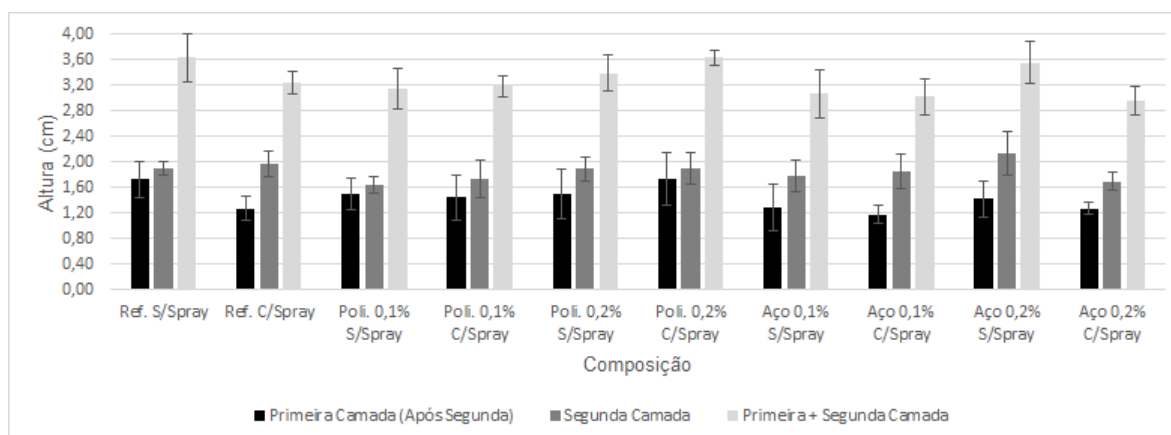
Os resultados obtidos em relação à primeira camada após o depósito da segunda, da segunda camada e as suas respectivas somas são apresentados na Tabela 18.

Tabela 18 – Altura da primeira camada após o depósito da segunda, segunda camada e primeira mais segunda camada.

Composição	Primeira camada (Após o depósito da segunda)		Segunda camada		Primeira + segunda camada	
	Altura (cm)	Desvio pad. (cm)	Altura (cm)	Desvio pad. (cm)	Altura (cm)	Desvio pad. (cm)
Ref. S/Spray	1,73	0,28	1,9	0,11	3,63	0,37
Ref. C/Spray	1,27	0,18	1,97	0,2	3,24	0,18
(0,1%) Poli. S/Spray	1,51	0,25	1,65	0,13	3,15	0,32
(0,1%) Poli. C/Spray	1,44	0,35	1,74	0,3	3,18	0,16
(0,2%) Poli. S/Spray	1,49	0,39	1,89	0,18	3,38	0,28
(0,2%) Poli. C/Spray	1,73	0,4	1,9	0,25	3,63	0,12
(0,1%) Aço S/Spray	1,29	0,37	1,78	0,24	3,07	0,37
(0,1%) Aço C/Spray	1,17	0,14	1,85	0,27	3,02	0,28
(0,2%) Aço S/Spray	1,42	0,28	2,13	0,33	3,55	0,33
(0,2%) Aço C/Spray	1,27	0,09	1,69	0,14	2,96	0,23

Fonte: Autor, 2022.

Figura 39 – Altura da primeira camada após o depósito da segunda, segunda camada e primeira mais segunda camada.



Fonte: Autor, 2022.

As alturas totais (primeira e segunda camada) das amostras foram entre 2,96

cm a 3,63 cm. As amostras que apresentaram as maiores alturas totais foram a de referência sem *spray* e 0,2% Poli. com *spray*, já a menor foi a de 0,2% Aço com *spray*.

Foi realizada a análise de variância (ANOVA) e o teste de Tukey para a segunda camada e para a primeira mais segunda camada. Para isso foi utilizado o *software Past Program* com 5% de significância, em que os resultados obtidos estão apresentados no Apêndice A. Verificou-se que para todas as composições não foi apresentada uma diferença significativa na segunda camada. Já em relação à primeira com a segunda camada as únicas composições que apresentaram diferença significativa foram entre a de referência sem *spray* e de 0,2% Aço com *spray*.

Destaca-se dessa maneira que a incorporação de diferentes teores de fibras e da aplicação do *spray* de água sobre a superfície da primeira camada não foram os principais fatores contribuintes na variação da altura das camadas. Apresentando diferença significativa somente entre as amostras de referência sem *spray* de água e a de 0,2% Aço com *spray*.

Outras variáveis podem representar maiores contribuições, como: a variação da temperatura do ambiente, a umidade relativa do ar e o teor de aditivo superplastificante utilizado para cada composição. Essas variáveis colaboram com a plasticidade do material, interferindo na velocidade da impressão e conseqüentemente na altura das camadas.

A relação entre a deformação da primeira camada com o índice de consistência de cada composição é apresentada na Tabela 19.

Tabela 19 – Relação entre deformação da primeira camada e índice de consistência.

<b>Composição</b>	<b>Deformação (%)</b>	<b>Índice de consistência (cm)</b>
Ref. S/Spray	12,91	27,91
Ref. C/Spray	29,9	
(0,1%) Poli. S/Spray	17,69	28,54
(0,1%) Poli. C/Spray	21,86	
(0,2%) Poli. S/Spray	23,9	28,67
(0,2%) Poli. C/Spray	12,56	
(0,1%) Aço S/Spray	24,85	27,67
(0,1%) Aço C/Spray	31,73	
(0,2%) Aço S/Spray	29,52	29,3
(0,2%) Aço C/Spray	19,03	

Fonte: Autor, 2022.

A relação entre o índice de consistência e a deformação das diferentes composições não apresentaram variações significativas (Tabela 19).

## 4.2 ESTADO ENDURECIDO

No estado endurecido foram analisados dois tipos de amostras, as moldadas para a caracterização mecânica do concreto e as impressas. Para as amostras moldadas foram avaliadas as resistências à compressão axial e à tração na flexão. Para as impressas, a resistência à compressão axial e aderência entre as camadas. Todos os resultados foram submetidos à análise estatística: médias, desvios padrão, coeficiente de variação, análise de variância (ANOVA) e teste de Tukey.

### 4.2.1 Amostras moldadas

#### 4.2.1.1 Resistência à compressão axial

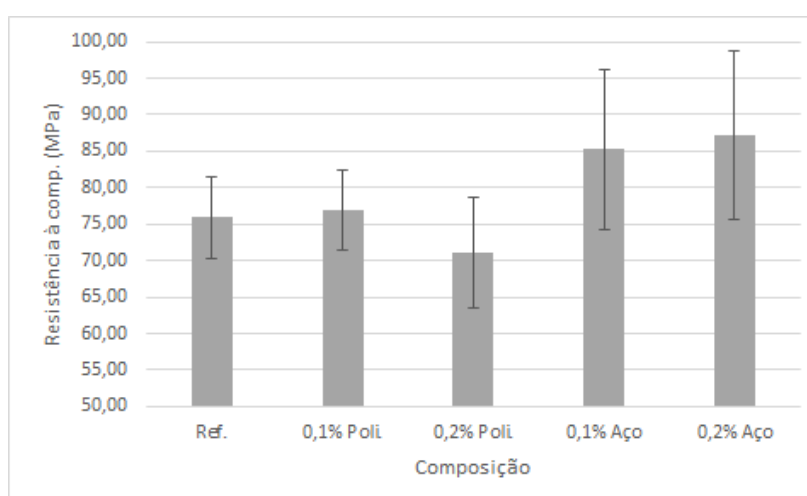
A resistência à compressão axial das amostras moldadas para cada composição, aos 28 dias, são apresentadas na Tabela 20, com suas: médias, desvios padrão e o coeficientes de variação.

Tabela 20 – Resultado de resistência à compressão das amostras moldadas para cada composição.

Composição	Resistência à compressão axial média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Coefficiente de variação (%)
Ref.	75,91	5,56	7,32
(0,1%) Poli.	76,96	5,43	7,06
(0,2%) Poli.	71,10	11,49	10,71
(0,1%) Aço	85,21	11,01	12,92
(0,2%) Aço	87,14	11,54	13,24

Fonte: Autor, 2022.

Figura 40 – Resistência à compressão das amostras moldadas para cada composição.



Fonte: Autor, 2022.

Ao analisar-se a resistência à compressão axial média, cujos valores estão apresentados na Figura 40, percebe-se que para as amostras com microfibras de polipropileno ocorreu um aumento de 1,38% e um decréscimo de 6,34% para os teores de 0,1% e 0,2%, respectivamente.

Já para as amostras com microfibras de aço, percebe-se um aumento significativo da resistência à compressão quando comparado às outras composições, apresentando um acréscimo de 12,25% e 14,8% para os teores de 0,1% e 0,2% de microfibras de aço em relação ao de referência.

Foi realizado para todas as composições a análise de variância (ANOVA) e teste de Tukey no *software Past Program* com 5% de significância, a solução completa dos resultados são apresentados no Apêndice B. Na análise estatística foi identificada diferença significativa entre as amostras de referência e de microfibras de aço em ambos os teores.

A efeito da incorporação das microfibras de polipropileno foram insignificantes em relação ao desempenho mecânico do compósito. Já em relação às peças com microfibras de aço, os resultados são semelhantes ao encontrado por Arunothayan *et al.* (2020), no qual o desempenho à compressão dos elementos com microfibras de aço foram superiores ao de referência.

#### 4.2.1.2 Resistência à tração na flexão

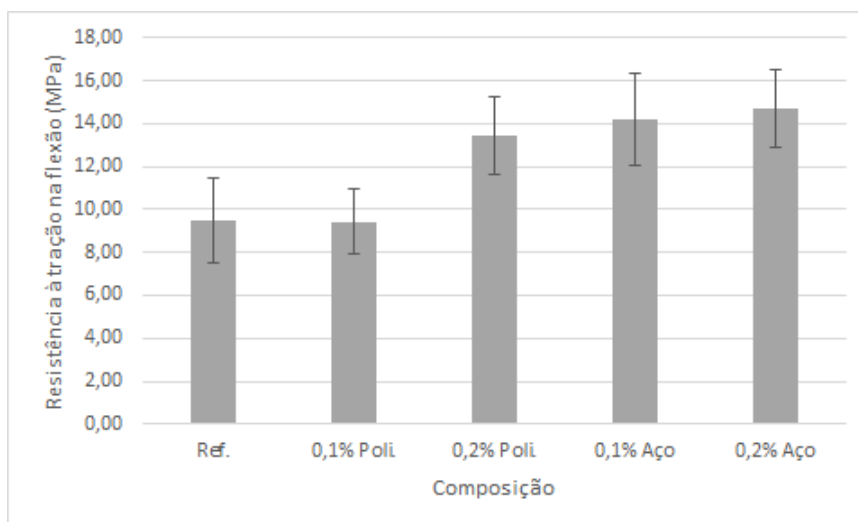
Os resultados da resistência à tração na flexão das amostras moldadas para cada composição, aos 28 dias, são apresentados na Tabela 21, com suas: médias, desvios padrão e o coeficientes de variação.

Tabela 21 – Resultado de resistência à tração na flexão das amostras moldadas para cada composição.

<b>Composição</b>	<b>Resis. à tração na flexão média (MPa)</b>	<b>Desvio padrão (MPa)</b>	<b>Coeficiente de variação (%)</b>
Ref.	9,48	1,95	20,62
(0,1%) Poli.	9,42	1,52	16,10
(0,2%) Poli.	13,42	1,82	13,53
(0,1%) Aço	14,18	2,17	15,28
(0,2%) Aço	14,71	1,82	12,38

Fonte: Autor, 2022.

Figura 41 – Resistência à tração na flexão das amostras moldadas para cada composição.



Fonte: Autor, 2022.

Ao analisar os resultados obtidos de resistência à tração na flexão (Figura 41), observa-se um aumento significativo da resistência das amostras com fibras em relação ao de referência, exceto a composição com 0,1% de teor de microfibras de polipropileno. Esse aumento da resistência é de 41,56%, 49,58% e 55,17% para as amostras com teores de 0,2% de polipropileno, 0,1% de aço e 0,2% de aço, respectivamente. No entanto, para a amostra com teor de 0,1% de polipropileno o resultado foi bastante semelhante ao de referência com um decréscimo de 0,63% na resistência à tração na flexão.

Foi realizado para todas as amostras a análise de variância (ANOVA) e teste de Tukey no *software Past Program* com 5% de significância, a solução completa é apresentada no Apêndice B. Na análise de variância foi identificada diferença significativa entre as amostras. Pelo teste de Tukey identificou-se que todas as amostras, exceto a de 0,1% de polipropileno, apresentaram diferença significativa em relação à composição de referência.

Observasse que a incorporação de fibras de aço apresentou uma melhoria significativa no desempenho mecânico das peças (resistência à compressão e à tração na flexão), resultados semelhantes aos encontrados na bibliografia (ARUNOTHAYAN *et al.*, 2020). Na Figura 42 é apresentada uma amostrada rompida após o ensaio de resistência à tração na flexão (0,2% Aço).



Figura 42 – Amostra rompida após o ensaio de resistência à tração na flexão.



Fonte: Autor, 2022.

Já as amostras com incorporação de fibras de polipropileno não obtiveram diferença significativa em relação à composição de referência, somente a incorporação com teor de 0,2% de polipropileno obteve melhor desempenho à tração na flexão.

Em relação ao comportamento pós-fissuração dos elementos de concreto com incorporação de fibras, não foram analisados durante o programa experimental deste trabalho.

## 4.2.2 Amostras impressas

### 4.2.2.1 Resistência à compressão axial

Devido à anisotropia das amostras impressas, para a obtenção da resistência à compressão axial, duas direções de carregamento foram realizadas. Do tipo 1 com carregamento perpendicular à união entre as camadas e do tipo 2 com carregamento paralelo (Seção 3.2.6.2).

Os resultados obtidos da resistência à compressão axial das amostras impressas, aos 28 dias, são apresentados na: Tabela 22, Tabela 23, Figura 43 e Figura 44. Em que contem, as suas: médias, desvios padrão e coeficientes de variação.

Tabela 22 – Resultado da resistência à compressão das amostras impressas - Tipo 1.

Composição	Tipo 1		
	Resis. à compressão média (MPa)	Des. padrão (MPa)	Coef. de varia. (%)
Ref. S/Spray	43,46	5,05	11,63
Ref. C/Spray	46,64	4,25	9,10
(0,1%) Poli. S/Spray	49,65	5,89	11,87
(0,1%) Poli. C/Spray	45,34	5,16	11,38
(0,2%) Poli. S/Spray	46,63	3,57	7,65
(0,2%) Poli. C/Spray	42,57	3,28	7,71
(0,1%) Aço S/Spray	44,02	2,63	5,98
(0,1%) Aço C/Spray	46,68	6,04	12,94
(0,2%) Aço S/Spray	42,19	2,84	6,73
(0,2%) Aço C/Spray	52,75	2,06	3,90

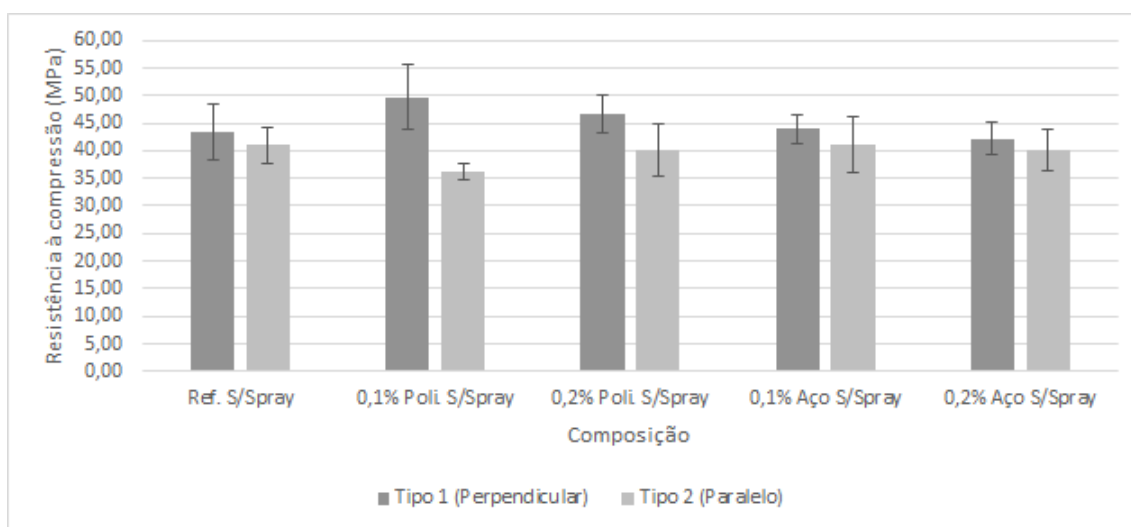
Fonte: Autor, 2022.

Tabela 23 – Resultado da resistência à compressão das amostras impressas - Tipo 2.

Composição	Tipo 2		
	Resis. à compressão média (MPa)	Des. padrão (MPa)	Coef. de varia. (%)
Ref. S/Spray	40,94	3,23	7,87
Ref. C/Spray	42,13	4,62	10,96
(0,1%) Poli. S/Spray	36,22	1,59	4,39
(0,1%) Poli. C/Spray	43,92	0,91	2,07
(0,2%) Poli. S/Spray	40,20	4,78	11,88
(0,2%) Poli. C/Spray	42,56	5,37	12,61
(0,1%) Aço S/Spray	41,13	5,12	12,45
(0,1%) Aço C/Spray	41,81	4,72	11,28
(0,2%) Aço S/Spray	40,27	3,77	9,35
(0,2%) Aço C/Spray	42,73	1,46	3,43

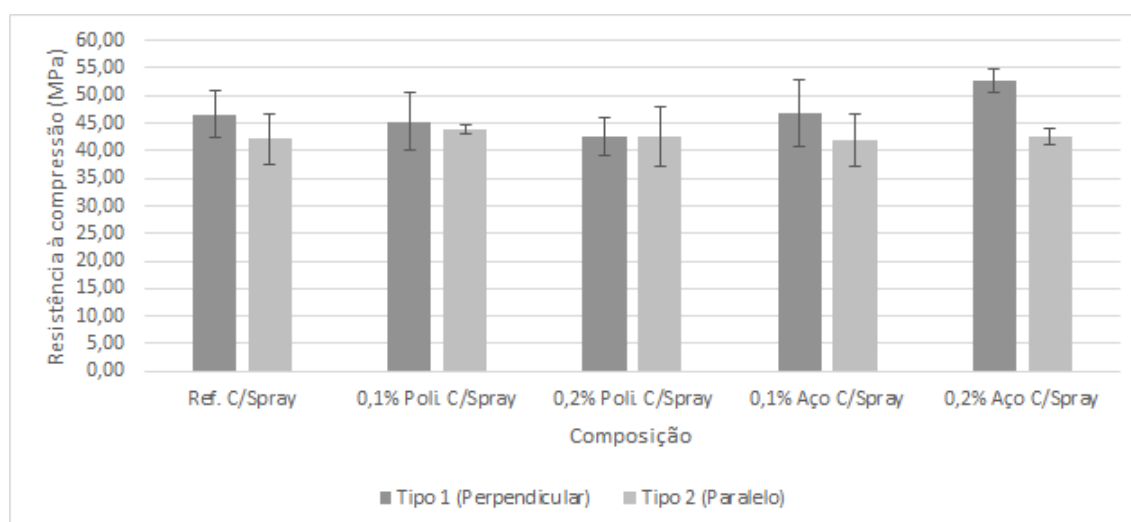
Fonte: Autor, 2022.

Figura 43 – Resistência à compressão das amostras impressas para as composições sem aplicação de spray de água.



Fonte: Autor, 2022.

Figura 44 – Resistência à compressão das amostras impressas para as composições com aplicação de *spray* de água.



Fonte: Autor, 2022.

Ao observar as Figura 43 e Figura 44 é perceptível uma diminuição do desempenho da resistência à compressão, para todas as composições, entre as diferentes direções de ensaio, sendo do tipo 1 (perpendicular) superiores à do tipo 2 (paralelo). A diferença entre as médias aritméticas são apresentadas na Tabela 24.

Tabela 24 – Diferença da resistência à compressão entre a posição do tipo 1 e 2.

Composição	Diferença das médias aritméticas (%)
Ref. S/Spray	5,79
Ref. C/Spray	9,67
(0,1%) Poli. S/Spray	27,04
(0,1%) Poli. C/Spray	3,13
(0,2%) Poli. S/Spray	13,80
(0,2%) Poli. C/Spray	0,01
(0,1%) Aço S/Spray	6,55
(0,1%) Aço C/Spray	10,42
(0,2%) Aço S/Spray	4,57
(0,2%) Aço C/Spray	18,99

Fonte: Autor, 2022.

A anisotropia das amostras de impressão 3D, na qual as diferentes direções de carregamento apresentam propriedades mecânicas distintas (Seção 2.1.5.2), são encontradas entre a direção do tipo 1 (carregamento perpendicular às camadas) e tipo 2 (carregamento paralelo às camadas). Le *et al.* (2012b) obtiveram resultados semelhantes, em que a direção tipo 1 foi superior ao do tipo 2.

Em relação à aplicação do procedimento de *spray* de água na superfície da amostra, as diferenças obtidas entre as amostras sem e com borrifamento são apre-

sentas na Tabela 25.

Tabela 25 – Diferença da resistência à compressão entre amostras sem e com aplicação de *spray*.

Composição	Diferença das médias aritméticas (%)	
	Tipo 1	Tipo 2
Ref.	-7,32	-2,91
(0,1%) Poli.	8,67	-21,25
(0,2%) Poli.	8,71	-5,89
(0,1%) Aço	-6,03	-1,64
(0,2%) Aço	-25,02	-6,12

Fonte: Autor, 2022.

As amostras com aplicação de *spray* de água sobre a superfície da primeira camada, obtiveram desempenho superiores aos das amostras sem aplicação, exceto para os corpos de prova com incorporação de microfibras de polipropileno no carregamento do tipo 1. Entre as principais hipóteses contribuintes, estão: o maior contato entre as superfícies e a maior hidratação do cimento entre as duas camadas.

Já a incorporação das microfibras resultou na variação da resistência à compressão para as diferentes amostras, ocorrendo aumento ou diminuição do desempenho em relação à amostra de referência. Na Tabela 26 são apresentadas as diferenças de desempenho em relação à referência para as amostras sem aplicação de *spray* de água e na Tabela 27 para as amostras com aplicação.

Tabela 26 – Diferença da resistência à compressão das amostras sem aplicação de *spray* em relação à amostra de referência.

Composição	Diferença das médias aritméticas (%)	
	Tipo 1	Tipo 2
Ref.	0,00	0,00
(0,1%) Poli.	12,46	-13,03
(0,2%) Poli.	6,80	-1,86
(0,1%) Aço	1,27	0,46
(0,2%) Aço	-3,00	-1,68

Fonte: Autor, 2022.

Tabela 27 – Diferença da resistência à compressão das amostras com aplicação de *spray* em relação à amostra de referência.

Composição	Diferença das médias aritméticas (%)	
	Tipo 1	Tipo 2
Ref.	0,00	0,00
(0,1%) Poli.	-2,86	4,07
(0,2%) Poli.	-9,57	1,01
(0,1%) Aço	0,07	-0,77
(0,2%) Aço	11,58	1,40

Fonte: Autor, 2022.

A incorporação das microfibras resultou em um aumento na resistência à compressão para os dois tipos de carregamentos (paralelo e perpendicular) somente para as amostras com incorporação de 0,2% de microfibras de aço com aplicação de *spray* de água. A amostra com incorporação de 0,2% de microfibras de aço com carregamento do tipo 1 e aplicação de *spray* de água obteve um ganho de resistência em relação as demais amostras, uma das principais hipóteses para esse aumento de desempenho está relacionada as possíveis variabilidades que esse tipo de ensaio pode apresentar.

Para avaliar quais amostras apresentaram diferenças significativas, foi realizado a análise de variância (ANOVA) e teste de Tukey no *software Past Program* com 5% de significância. A solução completa dos resultados são apresentados no Apêndice C.

Em seus resultados, as amostras com o carregamento do tipo 1 (perpendicular a camada) obtiveram diferença significativa pela análise de variância (ANOVA). No teste de Tukey, somente a amostra com 0,2% aço com aplicação de *spray* obteve diferença significativa em relação à amostra de referência sem aplicação de *spray*. Já as amostras com carregamento do tipo 2 (paralelo a camada) não obtiveram diferença significativa.

Portanto, a incorporação de microfibras de polipropileno não resultou em uma modificação significativa na resistência à compressão das amostras. Já a incorporação de microfibras de aço com teor de 0,2% e com a aplicação do borrifamento de água na primeira camada, promoveu um aumento significativo (11,58%) da resistência à compressão em relação à amostra de referência.

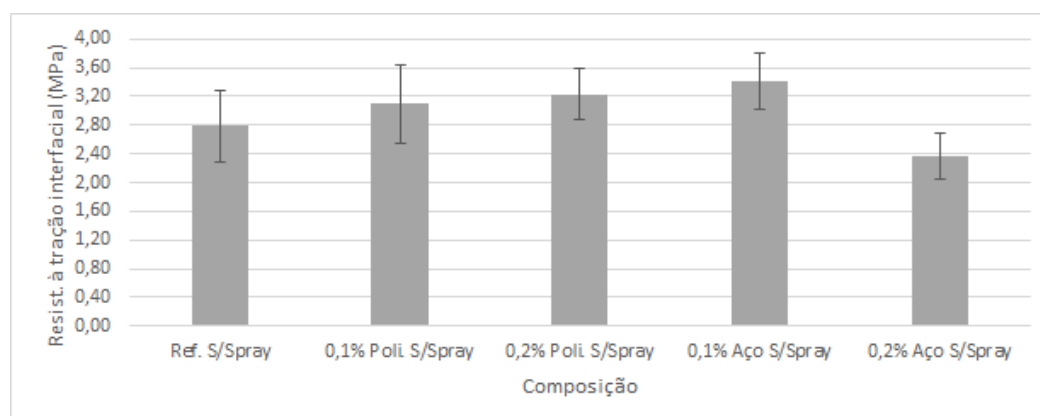
#### 4.2.2.2 Aderência entre camadas

O desempenho da aderência entre as camadas das amostras impressas foi obtido por meio do teste de partição de prisma (Seção 3.2.6.3), após o período de 28 dias de cura o teste foi realizado. A partir da Equação (5) foi obtida a resistência à tração interfacial das amostras. Os resultados são apresentados na Tabela 28, com suas: médias, desvios padrão e o coeficientes de variação.

Tabela 28 – Resultado da resistência à tração interfacial.

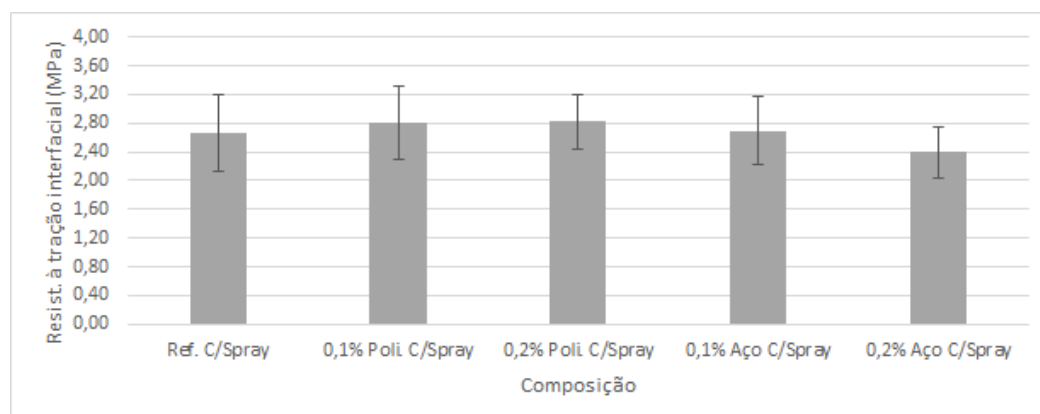
Composição	Resis. à tração interfacial média (MPa)	Des. padrão (MPa)	Coef. de varia. (%)
Ref. S/Spray	2,78	0,49	17,59
Ref. C/Spray	2,67	0,53	19,83
(0,1%) Poli. S/Spray	3,09	0,55	17,92
(0,1%) Poli. C/Spray	2,80	0,51	18,23
(0,2%) Poli. S/Spray	3,22	0,36	11,02
(0,2%) Poli. C/Spray	2,82	0,39	13,68
(0,1%) Aço S/Spray	3,41	0,38	11,28
(0,1%) Aço C/Spray	2,70	0,47	17,44
(0,2%) Aço S/Spray	2,36	0,33	13,90
(0,2%) Aço C/Spray	2,40	0,35	14,66

Fonte: Autor, 2022.

Figura 45 – Resistência à tração interfacial das amostras impressas para as composições sem aplicação de *spray* de água.

Fonte: Autor, 2022.

Figura 46 – Resistência à tração interfacial das amostras impressas para as composições com aplicação de *spray* de água.



Fonte: Autor, 2022.

Na Tabela 28 os coeficientes de variação, entre 11,02% e 19,83%, são semelhantes aos encontrados na bibliografia (WANG, L. *et al.*, 2021). Ao observar as Figura 45 e Figura 46 é possível analisar duas variáveis que podem influenciar a resistência à tração interfacial, sendo a incorporação dos diferentes tipos e teores de microfibras e a aplicação ou não do *spray* de água.

Em relação à aplicação ou não do *spray* de água, as diferenças obtidas entre as amostras sem e com aplicação de *spray* estão apresentadas na Tabela 29.

Tabela 29 – Diferença da resistência à tração interfacial das amostras sem e com aplicação de *spray* de água.

Composição	Diferença (%)
Ref.	4,19
(0,1%) Poli.	9,35
(0,2%) Poli.	12,49
(0,1%) Aço	20,86
(0,2%) Aço	-1,37

Fonte: Autor, 2022.

A aplicação do *spray* de água na primeira camada resultou em uma diminuição da resistência à tração interfacial das amostras, exceto para a amostra com incorporação de 0,2% de microfibras de aço. Algumas das hipóteses para essa diminuição, são: o aumento da relação água/cimento na região de contato entre as camadas e a modificação da orientação preferencial das fibras. Na Tabela 30 é apresentada a diferença de desempenho das amostras com microfibras em relação à de referência.

Tabela 30 – Diferença da resistência à tração interfacial das amostras com incorporação de microfibras em relação com a de referência.

Composição	Diferença (%)	
	Sem Spray	Com Spray
Ref.	0,00	0,00
(0,1%) Poli.	9,98	4,86
(0,2%) Poli.	13,64	5,54
(0,1%) Aço	18,37	1,18
(0,2%) Aço	-17,70	-11,25

Fonte: Autor, 2022.

Em relação à incorporação das microfibras é observado um ganho de desempenho da aderência entre as camadas de acordo com o teor e o tipo de fibra incorporado, exceto para o teor de 0,2% de microfibras de aço (Tabela 28).

Durante a realização do ensaio de aderência entre as camadas, as amostras se comportaram de maneira frágil, já que ocorreu uma queda repentina de carga ao final da curva tensão-deslocamento. No entanto, é notável um aumento da resistência à tração interfacial das amostras. Arunothayan *et al.* (2020) obtiveram resultados semelhantes, ocorrendo aumento da resistência à tração interfacial das amostras com incorporação de microfibras de aço.

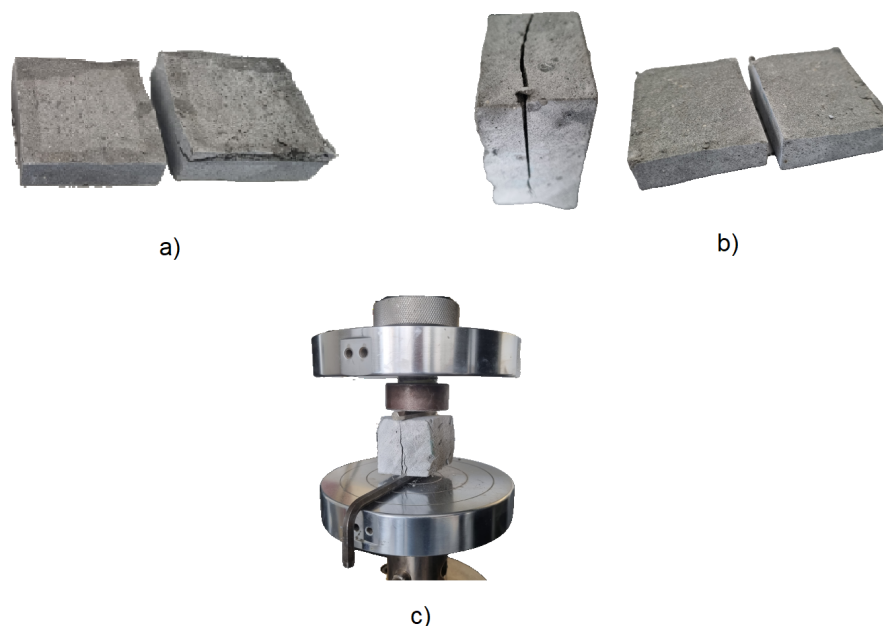
Para todos os resultados das amostras da resistência à tração interfacial foi verificada a análise de variância (ANOVA) e teste de Tukey no *software Past Program* com 5% de significância, a solução completa é apresentada no Apêndice C. A análise de variância indicou diferença significativa entre as amostras, sendo verificado pelo teste de Tukey que as composições com teor de 0,2% de microfibras de polipropileno e 0,1% de microfibras de aço, ambas sem aplicação de *spray*, apresentaram diferença significativa em relação à amostra de referência.

Portanto, a aplicação do *spray* de água sobre a superfície da amostra não apresentou influência significativa sobre os resultados em relação à amostra de referência. Já a incorporação das microfibras em teores de 0,2% de polipropileno e de 0,1% de aço, apresentaram importante papel na melhoria de desempenho das amostras.

A aderência entre as camadas para as peças produzidas por impressão 3D apresenta um importante papel para as propriedades mecânicas do concreto, já que essa é a região de menor desempenho mecânico. A incorporação das microfibras representou em seus resultados uma alternativa viável para minimizar os efeitos da fragilidade da região interfacial. Na Figura 47 é demonstrado o aspecto visual da interface do concreto após a ruptura pelo ensaio de aderência interfacial.



Figura 47 – Aspecto visual das amostras rompidas, com teor de: a) 0,1% de polipropileno; b) 0,1% de aço; c) 0,2% de aço.



Fonte: Autor, 2022.

A fratura das amostras sempre ocorreu na interface, como apresentada na Figura 47.

### 4.3 ANÁLISE GERAL

Durante a realização do programa experimental foram encontradas as seguintes limitações:

- Equipamento de impressão: velocidade de impressão, motor do equipamento, tamanho das amostras e tempo de deposição entre camadas;
- Extração dos corpos de prova: a serra utilizada para a extração das amostras não apresentava precisão, ocasionando variabilidade nas dimensões dos corpos de prova.

Diante das limitações do equipamento, o material depositado deveria apresentar boa fluidez. Consequentemente, a incorporação das microfibras ocasionava entupimentos da impressora. A principal justificativa em relação a dificuldade da passagem do material pelo equipamento está relacionada ao motoro elétrico de modelo Slider Maxi AL - RCG com 220V 1/4 HP 300 Kg.

Essa limitação foi contornada com o aumento o teor de aditivo superplastificante. A maior fluidez do material proporcionou o aumento do índice de consistência e a diminuição da altura das camadas.

## 5 CONCLUSÃO

Neste capítulo serão apresentadas as principais conclusões sobre os resultados deste trabalho. Além de algumas sugestões para novos estudos da manufatura aditiva de concreto.

Os resultados obtidos são limitados em relação a alguns parâmetros, como: composições, materiais, equipamento de impressão e procedimentos adotados.

Na análise dos resultados em relação à estabilidade de forma das camadas, concluiu-se que a altura da primeira camada sofreu diminuição após o depósito da segunda. No entanto, a aplicação do *spray* de água sobre a primeira camada e a incorporação de diferentes teores e tipos de microfibras não representaram efeito significativo sobre a variação da altura da camada.

Em relação à segunda camada, percebe-se que a sua altura foi superior ao da primeira camada. No entanto, nenhuma diferença significativa foi observada em relação às variáveis da aplicação de *spray* de água e da incorporação de microfibras. A principal hipótese é a de que a maior fluidez ocasionada pelo maior teor de aditivo superplastificante para as amostras com microfibras impediu a melhoria da estabilidade de forma das camadas.

Já em relação ao estado endurecido das amostras moldadas, a resistência à compressão axial apresentou um aumento para as peças com incorporação de microfibras de aço em ambos os teores. Todavia, a incorporação de microfibras de polipropileno não representou diferença significativa.

Desempenho semelhante é encontrado na resistência à tração à flexão das amostras moldadas, em que a incorporação de microfibras de aço em ambos os teores e de 0,2% de polipropileno representaram um ganho de desempenho significativo. Somente as peças com teor de 0,1% de polipropileno não obtiveram diferença significativa em relação à amostra de referência.

Na análise da resistência à compressão axial dos elementos impressos, concluiu-se que a direção de ensaio apresenta efeito significativo sobre a resistência da amostra. Os elementos com carregamento do tipo 2 (carregamento paralelo às camadas) demonstraram desempenhos inferiores ao do tipo 1 (carregamento perpendicular às camadas). Demonstrando a característica anisotrópica dos elementos de impressão 3D de concreto.

A aplicação de *spray* de água e a incorporação das microfibras não representaram efeito significativo para os carregamentos do tipo 1 e 2 na resistência à compressão axial, exceto para o tipo 1 com teor de 0,2% de microfibras de aço e com *spray* de água.

Outro aspecto importante é a variação dos resultados obtidos da resistência à compressão axial em relação às amostras moldadas e impressas. Os elementos moldados apresentaram um desempenho superior aos impressos em: 42,97%, 43,11%,

39,53%, 49,06% e 48,95%; para as amostras de: referência, 0,1% e 0,2% de polipropileno, 0,1% e 0,2% de aço, respectivamente. Wolfs, Bos e Salet (2019) obtiveram resistência à compressão maiores nas amostras moldadas em relação às impressas (aproximadamente 31%).

Na análise da aderência entre as camadas, foi possível identificar que a aplicação do *spray* de água sobre a superfície da amostra não representou influência significativa entre os elementos investigados, ocasionando uma piora sobre o desempenho desses elementos. Já a incorporação das microfibras proporcionaram uma melhoria significativa, com aumento da resistência à tração interfacial de 13,64% e 18,37% das amostras com 0,2% de polipropileno sem *spray* e com 0,1% aço sem *spray*, respectivamente.

Esses resultados evidenciam a maior contribuição das microfibras para as peças de impressão 3D de concreto. Contrapondo com os resultados encontrados por Nematollahi *et al.* (2018b) e Sanjayan *et al.* (2018). A principal hipótese é em relação ao maior teor de superplastificante para as amostras com microfibras, modificando a quantidade de água livre na mistura, e portanto, favorecendo a ligação entre camadas.

A possibilidade de proporcionar um ganho de desempenho com a incorporação de microfibras é de grande relevância, já que o encontro entre as camadas corresponderam à região de maior fragilidade dos elementos de concreto impressos.

Os procedimentos de ensaio efetuados por este estudo, em relação às amostras moldadas, resistência à compressão axial e tração na flexão, seguiram as normas vigentes. Todavia para os elementos impressos, diante da inexistência de normatizações, os procedimentos realizados sofreram adaptações em relação a ensaios já preconizados. Por meio deste trabalho, foi possível analisar as principais contribuições e malefícios da incorporação de fibras na manufatura aditiva de concreto, no estado fresco (estabilidade de forma das camadas) e no estado endurecido (desempenho mecânico).

## 5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A fim de promover a continuidade de pesquisas relacionadas a este trabalho, buscando-se respostas a lacunas não exploradas. São apresentadas algumas sugestões de temas, sendo as seguintes:

- Avaliar as propriedades de durabilidade de elementos de concreto impressos com incorporação de fibras;
- Realizar análise no estado fresco (extrudabilidade e construtibilidade) em elementos de concreto impressos com incorporação de diferentes tipos de fibras;
- Investigar as propriedades no estado fresco e endurecido de elementos com

outros tipos e teores de fibras e microfibras;

- Avaliar tempos variados de deposição de camadas, e investigar a "janela" de impressão da composição;
- Analisar o efeito da adição de outros tipos de aditivos químicos sobre as propriedades reológicas, físicas e mecânicas de concreto para impressão 3D com incorporação de fibras;
- Avaliar o desempenho pós-fissuração de elementos de concreto com fibras de manufatura aditiva.

## REFERÊNCIAS

ACI COMMITTEE, American Concrete Institute -. ACI 544.1 R-96: State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete. **Detroit: ACI Committee**, 1996.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM C 496**: Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens. West Conshohocken, nov. 2017.

ARUNOTHAYAN, Arun R.; NEMATOLLAHI, Behzad; RANADE, Ravi; BONG, Shin Hau; SANJAYAN, Jay. Development of 3D-printable ultra-high performance fiber-reinforced concrete for digital construction. **Construction and Building Materials**, Elsevier Ltd, v. 257, out. 2020. ISSN 09500618.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11768**: Aditivos químicos para concreto de cimento Portland Parte 3: Ensaio de caracterização. Rio de Janeiro, out. 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13276**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos — Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, ago. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13278**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos — Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. Rio de Janeiro, out. 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13279**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos — Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, out. 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13956-1**: Sílica ativa para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta - Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro, ago. 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15530**: Fibras de aço para concreto — Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, nov. 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16916**: Agregado miúdo — Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro, abr. 2021.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: Agregados para concreto — Especificações. Rio de Janeiro, abr. 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248**: Agregados — Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, set. 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS/ INTERNATIONAL ORGANIZATION STANDARDIZATION. **ISO/ASTM 52900**: Manufatura Aditiva — Princípios Gerais — Terminologia. Geneva, nov. 2018.
- BARBOSA, Filipe; WOETZEL, Jonathan; MISCHKE, Jan. **Reinventing Construction: A Route of Higher Productivity**. [S.l.], 2017.
- BENTUR, Arnon; MINDESS, Sidney. **Fibre reinforced cementitious composites**. [S.l.]: Crc Press, 2006.
- BEUSHAUSEN, H.; ALEXANDER, M. G. Bond strength development between concretes of different ages. **Magazine of Concrete Research**, v. 60, p. 65–74, 1 fev. 2008. ISSN 00249831.
- BOS; BOSCO; SALET. Ductility of 3D printed concrete reinforced with short straight steel fibers. **Virtual and Physical Prototyping**, v. 14, n. 2, p. 160–174, 2019. eprint: <https://doi.org/10.1080/17452759.2018.1548069>.
- BUSWELL, R.A.; LEAL DE SILVA, W.R.; JONES, S.Z.; DIRRENBERGER, J. 3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research. **Cement and Concrete Research**, v. 112, p. 37–49, 2018. SI : Digital concrete 2018. ISSN 0008-8846.
- CAMACHO, Daniel Delgado; CLAYTON, Patricia; O'BRIEN, William; FERRON, Raissa; JUENGER, Maria; SALAMONE, Salvatore; SEEPERSAD, Carolyn. Applications of additive manufacturing in the construction industry—a prospective review. *In*: IAARC PUBLICATIONS. ISARC. Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction. [S.l.: s.n.], 2017. v. 34.
- CONTROLS. **Universal Concrete and Asphalt Saw, MULTISAW**. [S.l.: s.n.], nov. 2022. url<https://www.controls-group.com/eng/coring-cutting-and-grinding-machines/universal-concrete-and-asphalt-saw-multisaw.php>.

DI PRISCO, Marco; COLOMBO, Matteo; DOZIO, Daniele. Fibre-reinforced concrete in fib Model Code 2010: principles, models and test validation. **Structural Concrete**, Wiley Online Library, v. 14, n. 4, p. 342–361, 2013.

FIGUEIREDO. **Concreto com fibras**. [S.l.]: Concreto, Ensino, Pesquisa e Realizações, São Paulo, Ed. Geraldo Cechella . . . , 2005.

FIGUEIREDO. **Concreto reforçado com fibras**. 2011. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo.

FIGUEIREDO. **Parâmetros de controle e dosagem do concreto projetado com fibras de aço**. 1997. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo.

HAMBACH, Manuel; VOLKMER, Dirk. Properties of 3D-printed fiber-reinforced Portland cement paste. **Cement and Concrete Composites**, v. 79, p. 62–70, 2017. ISSN 0958-9465.

HOSSEINI, Ehsan; ZAKERTABRIZI, Mohammad; KORAYEM, Asghar Habibnejad; XU, Guanzhong. A novel method to enhance the interlayer bonding of 3D printing concrete: An experimental and computational investigation. **Cement and Concrete Composites**, v. 99, p. 112–119, 2019. ISSN 0958-9465.

HOU, Shaodan; DUAN, Zhenhua; XIAO, Jianzhuang; YE, Jun. A review of 3D printed concrete: Performance requirements, testing measurements and mix design. **Construction and Building Materials**, v. 273, p. 121745, 2021. ISSN 0950-0618.

KAZEMIAN, Ali; YUAN, Xiao; COCHRAN, Evan; KHOSHNEVIS, Behrokh. Cementitious materials for construction-scale 3D printing: Laboratory testing of fresh printing mixture. **Construction and Building Materials**, v. 145, p. 639–647, 2017. ISSN 0950-0618.

KHOSHNEVIS, Behrokh. Automated construction by contour crafting—related robotics and information technologies. **Automation in Construction**, v. 13, n. 1, p. 5–19, 2004. The best of ISARC 2002. ISSN 0926-5805.

KHOSHNEVIS, Behrokh; HWANG, Dooil; YAO, Ke-Thia; YEH, Zhenghao. Mega-scale fabrication by contour crafting. **International Journal of Industrial and Systems Engineering**, Inderscience Publishers, v. 1, n. 3, p. 301–320, 2006.

KOTHMAN, Ivo; FABER, Niels. How 3D printing technology changes the rules of the game: Insights from the construction sector. **Journal of Manufacturing Technology Management**, Emerald Group Publishing Limited, 2016.

LE; AUSTIN, S.A.; LIM, S.; BUSWELL, R.A.; LAW, R.; GIBB, A.G.F.; THORPE, T. Hardened properties of high-performance printing concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 42, n. 3, p. 558–566, 2012. ISSN 0008-8846.

LE; AUSTIN, Simon A; LIM, Sungwoo; BUSWELL, Richard A; GIBB, Alistair GF; THORPE, Tony. Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete. **Materials and structures**, Springer, v. 45, n. 8, p. 1221–1232, 2012.

LI; GEISSERT, David G; FRANTZ, Gregory C; STEPHENS, Jack E. Freeze-thaw bond durability of rapid-setting concrete repair materials. **Materials Journal**, v. 96, n. 2, p. 242–249, 1999.

LI, L.G.; XIAO, B.F.; FANG, Z.Q.; XIONG, Z.; CHU, S.H.; KWAN, A.K.H. Feasibility of glass/basalt fiber reinforced seawater coral sand mortar for 3D printing. **Additive Manufacturing**, v. 37, p. 101684, 2021. ISSN 2214-8604.

LI *et al.* On the emergence of 3D printable Engineered, Strain Hardening Cementitious Composites (ECC/SHCC). **Cement and Concrete Research**, v. 132, p. 106038, 2020. ISSN 0008-8846.

LIM, S.; BUSWELL, R.A.; LE, T.T.; AUSTIN, S.A.; GIBB, A.G.F.; THORPE, T. Developments in construction-scale additive manufacturing processes. **Automation in Construction**, v. 21, p. 262–268, 2012. ISSN 0926-5805.

MA, Guowei; LI, Zhijian; WANG, Li; WANG, Fang; SANJAYAN, Jay. Mechanical anisotropy of aligned fiber reinforced composite for extrusion-based 3D printing. **Construction and Building Materials**, v. 202, p. 770–783, 2019. ISSN 0950-0618.

MEHTA, P Kumar; MONTEIRO, Paulo. **Concrete microstructure, properties and materials**. [S.l.: s.n.], 2017.

MOHAN, Manu K.; RAHUL, A.V.; DE SCHUTTER, Geert; VAN TITTELBOOM, Kim. Extrusion-based concrete 3D printing from a material perspective: A state-of-the-art review. **Cement and Concrete Composites**, v. 115, p. 103855, 2021. ISSN 0958-9465.



NAAMAN, AE; SHAH, SP. BOND STUDIES ON ORIENTED AND ALIGNED STEEL FIBRES. *In: RILEM Symp, Fibre Reinf Cem and Concr. [S.l.: s.n.], 1975. P. 171–178.*

NATIONS, United. World population prospects 2019. **Department of Economic and Social Affairs**, n. 141, 2019.

NEMATOLLAHI, Behzad; VIJAY, Praful; SANJAYAN, Jay; NAZARI, Ali; XIA, Ming; NAIDU NERELLA, Venkatesh *et al.* Effect of polypropylene fibre addition on properties of geopolymers made by 3D printing for digital construction. **Materials**, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 11, n. 12, p. 2352, 2018.

NEMATOLLAHI, Behzad; XIA, Ming; SANJAYAN, Jay; VIJAY, Praful. Effect of type of fiber on inter-layer bond and flexural strengths of extrusion-based 3D printed geopolymer. **Materials Science Forum**, Trans Tech Publications Ltd, v. 939, p. 155–162, 2018. ISSN 16629752.

NERELLA, Venkatesh Naidu; HEMPEL, Simone; MECHTCHERINE, Viktor. Effects of layer-interface properties on mechanical performance of concrete elements produced by extrusion-based 3D-printing. **Construction and Building Materials**, v. 205, p. 586–601, 2019. ISSN 0950-0618.

NERELLA, Venkatesh Naidu; MECHTCHERINE, Viktor. Studying the printability of fresh concrete for formwork-free concrete onsite 3D printing technology (CONPrint3D). *In: 3D Concrete Printing Technology. [S.l.]: Elsevier, 2019. P. 333–347.*

PADILHA, Valkiria Zucchetto. **Avaliação das propriedades mecânicas de elementos de concreto produzidos por impressão 3D**. Set. 2020. Tese (Doutorado) – Universidade Federal De Santa Catarina, Florianópolis.

PANDA, Biranchi; PAUL, Suvash Chandra; TAN, Ming Jen. Anisotropic mechanical performance of 3D printed fiber reinforced sustainable construction material. **Materials Letters**, v. 209, p. 146–149, 2017. ISSN 0167-577X.

PANDA, Biranchi; RUAN, Shaoqin; UNLUER, Cise; TAN, Ming Jen. Improving the 3D printability of high volume fly ash mixtures via the use of nano attapulgite clay. **Composites Part B: Engineering**, v. 165, p. 75–83, 2019. ISSN 1359-8368.

PELISSER, Fernando; S. SANTOS NETO, Almir Barros da; ROVERE, Henriette Lebre La; ANDRADE PINTO, Roberto Caldas de. Effect of the

addition of synthetic fibers to concrete thin slabs on plastic shrinkage cracking. **Construction and Building Materials**, v. 24, n. 11, p. 2171–2176, 2010. ISSN 0950-0618.

PHAM, Luong; TRAN, Phuong; SANJAYAN, Jay. Steel fibres reinforced 3D printed concrete: Influence of fibre sizes on mechanical performance. **Construction and Building Materials**, v. 250, p. 118785, 2020. ISSN 0950-0618.

ROUSSEL; CUSSIGH. Distinct-layer casting of SCC: The mechanical consequences of thixotropy. **Cement and Concrete Research**, v. 38, n. 5, p. 624–632, 2008. ISSN 0008-8846.

RUBIN, Ariane Prevedello. **Influência da taxa de estruturação nas propriedades reológicas, físicas e mecânicas de concretos para impressão 3D (3DCP)**. Mai. 2021. Tese (Doutorado) – Universidade Federal De Santa Catarina, Florianópolis.

RUBIN, Ariane Prevedello; HASSE, Jéssica Amanda; REPETTE, Wellington Longuini. The evaluation of rheological parameters of 3D printable concretes and the effect of accelerating admixture. **Construction and Building Materials**, v. 276, p. 122221, 2021. ISSN 0950-0618.

SANJAYAN; NEMATOLLAHI, Behzad; XIA, Ming; MARCHMENT, Taylor. Effect of surface moisture on inter-layer strength of 3D printed concrete. **Construction and Building Materials**, v. 172, p. 468–475, 2018. ISSN 0950-0618.

SCHULTE, Justine M; KILIC, Ugur; MA, Ji; OZBULUT, Osman E. Rheological and buildability characterization of PVA fiber-reinforced cementitious composites for additive construction. *In*: INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICS e PHOTONICS. BEHAVIOR and Mechanics of Multifunctional Materials XV. [S.l.: s.n.], 2021. v. 11589, 115890f.

SINGH, Amardeep; LIU, Qiong; XIAO, Jianzhuang; LYU, Qifeng. Mechanical and macrostructural properties of 3D printed concrete dosed with steel fibers under different loading direction. **Construction and Building Materials**, v. 323, p. 126616, 2022. ISSN 0950-0618.

SOUZA, Marcelo Tramontin; FERREIRA, Igor Maia; GUZI DE MORAES, Elisângela; SENFF, Luciano; NOVAES DE OLIVEIRA, Antonio Pedro. 3D printed concrete for large-scale buildings: An overview of rheology, printing parameters, chemical

admixtures, reinforcements, and economic and environmental prospects. **Journal of Building Engineering**, v. 32, p. 101833, 2020. ISSN 2352-7102.

SUN, Xiaoyan; GAO, Chao; WANG, Hailong. Bond performance between BFRP bars and 3D printed concrete. **Construction and Building Materials**, v. 269, p. 121325, 2021. ISSN 0950-0618.

TANESI, J. A influência das fibras de polipropileno no controle da fissuração por retração. **São Paulo, Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo**, 1999.

TAY, Yi Wei Daniel; QIAN, Ye; TAN, Ming Jen. Printability region for 3D concrete printing using slump and slump flow test. **Composites Part B: Engineering**, v. 174, p. 106968, 2019. ISSN 1359-8368.

WANG, Li; MA, Guowei; LIU, Tianhao; BUSWELL, Richard; LI, Zhijian. Interlayer reinforcement of 3D printed concrete by the in-process deposition of U-nails. **Cement and Concrete Research**, v. 148, p. 106535, 2021. ISSN 0008-8846.

WANG, Li; TIAN, Zehao; MA, Guowei; ZHANG, Mo. Interlayer bonding improvement of 3D printed concrete with polymer modified mortar: Experiments and molecular dynamics studies. **Cement and Concrete Composites**, v. 110, p. 103571, 2020. ISSN 0958-9465.

WANGLER, Timothy *et al.* Digital concrete: opportunities and challenges. **RILEM Technical Letters**, v. 1, p. 67–75, 2016.

WENG, Yiwei; LI, Mingyang; ZHANG, Dong; TAN, Ming Jen; QIAN, Shunzhi. Investigation of interlayer adhesion of 3D printable cementitious material from the aspect of printing process. **Cement and Concrete Research**, v. 143, p. 106386, 2021. ISSN 0008-8846.

WOLFS; BOS; SALET. Hardened properties of 3D printed concrete: The influence of process parameters on interlayer adhesion. **Cement and Concrete Research**, v. 119, p. 132–140, 2019. ISSN 0008-8846.

XIAO, Jianzhuang; CHEN, Zixuan; DING, Tao; ZOU, Shuai. Bending behaviour of steel cable reinforced 3D printed concrete in the direction perpendicular to the interfaces. **Cement and Concrete Composites**, v. 125, p. 104313, 2022. ISSN 0958-9465.

YAN, Jiongyi; DEMIRCI, Emrah; GANESAN, Ajith; GLEADALL, Andrew. Extrusion width critically affects fibre orientation in short fibre reinforced material extrusion additive manufacturing. **Additive Manufacturing**, v. 49, p. 102496, 2022. ISSN 2214-8604.

YE, Junhong; CUI, Can; YU, Jiangtao; YU, Kequan; DONG, Fangyuan. Effect of polyethylene fiber content on workability and mechanical-anisotropic properties of 3D printed ultra-high ductile concrete. **Construction and Building Materials**, Elsevier Ltd, v. 281, abr. 2021. ISSN 09500618.

YIN, Hongxi; QU, Ming; ZHANG, Haiyan; LIM, YeChan. 3D printing and buildings: A technology review and future outlook. **Technology| Architecture+ Design**, Taylor & Francis, v. 2, n. 1, p. 94–111, 2018.

YIN, Shi; TULADHAR, Rabin; SHI, Feng; COMBE, Mark; COLLISTER, Tony; SIVAKUGAN, Nagaratnam. Use of macro plastic fibres in concrete: A review. **Construction and Building Materials**, v. 93, p. 180–188, 2015. ISSN 0950-0618.

ZAREIYAN, Babak; KHOSHNEVIS, Behrokh. Effects of interlocking on interlayer adhesion and strength of structures in 3D printing of concrete. **Automation in Construction**, v. 83, p. 212–221, 2017. ISSN 0926-5805.

# **Apêndices**

## APÊNDICE A – TESTE DE ESTABILIDADE DE FORMA DAS CAMADAS

As planilhas geradas pelo *software Past Program* para a avaliações estatísticas da análise de variância (ANOVA) e teste de Tukey para todos os traços da primeira camada antes e após o depósito da segunda são apresentados abaixo (Figura 48 e Figura 49).

Figura 48 – ANOVA e teste de Tukey da primeira camada antes do depósito da segunda para todos os traços.

Test for equal means										
	Sum of sqrs	df	Mean square	F	$\rho$ (same)					
Between groups:	0,808359	9	0,0898176	2,95	0,01063					
Within groups:	1,0353	34	0,0304501		Permutation $\rho$ (n=99999)					
Total:	1,84366	43			0,01055					
Components of variance (only for random effects):										
Var(group):	0,0135112	Var(error):	0,0304501	ICC:	0,307343					
$\omega^2$ :	0,2851									
Levene's test for homogeneity of variance, from means				$\rho$ (same):	0,2284					
Levene's test, from medians				$\rho$ (same):	0,4106					
Welch F test in the case of unequal variances: $F=6,203$ , $df=13,34$ , $\rho=0,001608$										
Bayes factor: 3,555 (substantial evidence for unequal means)										
Tukey's Q below the diagonal, p(same) above the diagonal.										
Significant comparisons are pink.										
Copenhaver-Holland 1988 <input type="button" value="v"/>										
	Ref. Sem Spray	Ref. Com Spray	0,1% Poli. Sem Sp	0,1% Poli. Com Sp	0,2% Poli. Sem Sp	0,2% Poli. Com Sp	0,1% Aço Sem Sp	0,1% Aço Com Sp	0,2% Aço Sem Sp	0,2% Aço Com Sp
Ref. Sem Spray		0,8738	0,9472	0,9649	1	1	0,3222	0,4521	1	0,03774
Ref. Com Spray	2,153		1	1	0,9441	0,9056	0,9936	0,9981	0,7542	0,5638
0,1% Poli. Sem Sp	1,836	0,1933		1	0,9797	0,9608	0,9885	0,9958	0,8663	0,5483
0,1% Poli. Com Sp	1,717	0,4357	0,2175		0,9888	0,9752	0,9579	0,9821	0,8948	0,3832
0,2% Poli. Sem Sp	0,1752	1,854	1,576	1,444		1	0,4761	0,601	1	0,07584
0,2% Poli. Com Sp	0,006041	2,036	1,748	1,625	0,1719		0,3981	0,5221	1	0,05737
0,1% Aço Sem Sp	3,485	1,333	1,45	1,768	3,111	3,292		1	0,2351	0,9715
0,1% Aço Com Sp	3,165	1,136	1,261	1,546	2,837	3,009	0,1208		0,3399	0,9681
0,2% Aço Sem Sp	0,4591	2,489	2,178	2,078	0,6017	0,4298	3,745	3,438		0,02748
0,2% Aço Com Sp	4,947	2,918	2,951	3,328	4,527	4,699	1,661	1,691	5,129	

Fonte: Autor, 2022.

Figura 49 – ANOVA e teste de Tukey da primeira camada após do deposito da segunda para todos os traços.

Test for equal means											
	Sum of sqrs	df	Mean square	F	p (same)						
Between groups:	1,44619	9	0,160688	1,841	0,09633						
Within groups:	2,9672	34	0,0872706		Permutation p (n=99999)						
Total:	4,41339	43			0,09648						
Components of variance (only for random effects):											
Var(group):	0,0167087	Var(error):	0,0872706	ICC:	0,160693						
$\omega^2$ : 0,1468											
Levene's test for homogeneity of variance, from means					p (same):		0,2203				
Levene's test, from medians					p (same):		0,6951				
Welch F test in the case of unequal variances: F=1,939, df=13,46, p=0,1318											
Bayes factor: 0,4574 (no evidence for either equal or unequal means)											
Tukey's Q below the diagonal, p(same) above the diagonal. <span style="float: right;">Copenhaver-Holland 1988</span>											
Significant comparisons are pink.											
	Ref. Sem Spray	Ref. Com Spray	0,1% Poli. Sem S <sub>j</sub>	0,1% Poli. Com S <sub>j</sub>	0,2% Poli. Sem S <sub>j</sub>	0,2% Poli. Com S <sub>j</sub>	0,1% Aço Sem Sp	0,1% Aço Com Sp	0,2% Aço Sem Sp	0,2% Aço Com Sp	
Ref. Sem Spray		0,3349	0,9814	0,8747	0,9713	1	0,3763	0,1757	0,8656	0,4155	
Ref. Com Spray	3,452		0,9672	0,9946	0,9784	0,4005	1	1	0,9987	1	
0,1% Poli. Sem S <sub>j</sub>	1,556	1,698		1	0,985	0,9777	0,8314	1	0,9769		
0,1% Poli. Com S <sub>j</sub>	2,15	1,302	0,471		1	0,8998	0,9971	0,9281	1	0,9966	
0,2% Poli. Sem S <sub>j</sub>	1,663	1,591	0,1016	0,364		0,9769	0,986	0,8646	1	0,985	
0,2% Poli. Com S <sub>j</sub>	0,03211	3,286	1,506	2,059	1,608		0,4429	0,2216	0,8892	0,4746	
0,1% Aço Sem Sp	3,346	0,106	1,599	1,196	1,491	3,186		0,9999	0,9994	1	
0,1% Aço Com Sp	3,964	0,7101	2,285	1,938	2,183	3,791	0,81		0,9679	1	
0,2% Aço Sem Sp	2,18	1,074	0,5924	0,1534	0,4908	2,099	0,9741	1,693		0,9992	
0,2% Aço Com Sp	3,251	0,003568	1,608	1,224	1,506	3,114	0,09634	0,677	1,016		

Fonte: Autor, 2022.

Os resultados da análise de variância (ANOVA) e teste de Tukey de todos os traços da segunda camada e da soma da primeira com a segunda camada são apresentados abaixo (Figura 50 e Figura 51).

Figura 50 – ANOVA e teste de Tukey da segunda camada para todos os traços.

Test for equal means											
	Sum of sqrs	df	Mean square	F	p (same)						
Between groups:	0,761588	9	0,0846209	1,65	0,1405						
Within groups:	1,74391	34	0,0512915		Permutation p (n=99999)						
Total:	2,5055	43			0,1393						
Components of variance (only for random effects):											
Var(group):	0,00758531	Var(error):	0,0512915	ICC:	0,128834						
$\omega^2$ : 0,1173											
Levene's test for homogeneity of variance, from means					p (same):		0,4134				
Levene's test, from medians					p (same):		0,8922				
Welch F test in the case of unequal variances: F=1,655, df=13,4, p=0,1956											
Bayes factor: 0,277 (substantial evidence for equal means)											
Tukey's Q below the diagonal, p(same) above the diagonal. <span style="float: right;">Copenhaver-Holland 1988</span>											
Significant comparisons are pink.											
	Ref. Sem Spray	Ref. Com Spray	0,1% Poli. Sem S <sub>j</sub>	0,1% Poli. Com S <sub>j</sub>	0,2% Poli. Sem S <sub>j</sub>	0,2% Poli. Com S <sub>j</sub>	0,1% Aço Sem Sp	0,1% Aço Com Sp	0,2% Aço Sem Sp	0,2% Aço Com Sp	
Ref. Sem Spray		1	0,8081	0,9794	1	1	0,9976	1	0,8704	0,934	
Ref. Com Spray	0,6714		0,5336	0,8429	0,9999	1	0,9472	0,9979	0,9833	0,7324	
0,1% Poli. Sem S <sub>j</sub>	2,35	2,983		0,9998	0,8771	0,8499	0,996	0,9613	0,1108	1	
0,1% Poli. Com S <sub>j</sub>	1,58	2,251	0,861		0,9911	0,9861	1	0,9994	0,2638	1	
0,2% Poli. Sem S <sub>j</sub>	0,09309	0,7261	2,142	1,396		1	0,9993	1	0,8771	0,9642	
0,2% Poli. Com S <sub>j</sub>	0	0,633	2,23	1,489	0,08831		0,9985	1	0,9012	0,9515	
0,1% Aço Sem Sp	1,165	1,836	1,252	0,4147	1,005	1,098		1	0,4104	0,9999	
0,1% Aço Com Sp	0,512	1,145	1,744	0,9774	0,3974	0,4857	0,5864		0,7334	0,9939	
0,2% Aço Sem Sp	2,164	1,531	4,283	3,654	2,142	2,053	3,263	2,539		0,2014	
0,2% Aço Com Sp	1,908	2,541	0,4195	0,4189	1,722	1,81	0,8099	1,325	3,864		

Fonte: Autor, 2022.

Figura 51 – ANOVA e teste de Tukey da primeira com a segunda camada para todos os traços.

Test for equal means										
	Sum of sqrs	df	Mean square	F	$p$ (same)					
Between groups:	2,44165	9	0,271294	3,504	0,003673					
Within groups:	2,63237	34	0,0774226		Permutation $p$ (n=99999)					
Total:	5,07402	43			0,0036					
Components of variance (only for random effects):										
Var(group):	0,0441225	Var(error):	0,0774226	ICC:	0,363013					
$\omega^2$ :	0,3387									
Levene's test for homogeneity of variance, from means				$p$ (same):	0,271					
Levene's test, from medians				$p$ (same):	0,3919					
Welch F test in the case of unequal variances: $F=4,503$ , $df=13,43$ , $p=0,006841$										
Bayes factor: 10,48 (strong evidence for unequal means)										
Tukey's Q below the diagonal, $p$ (same) above the diagonal.										
Significant comparisons are pink.										
Copenhaver-Holland 1988 <input type="button" value="v"/>										
	Ref. Sem Spray	Ref. Com Spray	0,1% Poli. Sem Sj	0,1% Poli. Com Sj	0,2% Poli. Sem Sj	0,2% Poli. Com Sj	0,1% Aço Sem Sp	0,1% Aço Com Sp	0,2% Aço Sem Sp	0,2% Aço Com Sp
Ref. Sem Spray		0,4658	0,2872	0,2602	0,9396	1	0,06961	0,07097	1	0,04729
Ref. Com Spray	3,134		1	1	0,9987	0,4882	0,9886	0,9763	0,796	0,9431
0,1% Poli. Sem Sj	3,584	0,6289		1	0,976	0,3089	0,9999	0,9996	0,5916	0,9976
0,1% Poli. Com Sj	3,665	0,5304	0,1288		0,9797	0,2872	0,9996	0,9983	0,5797	0,9926
0,2% Poli. Sem Sj	1,879	1,076	1,617	1,576		0,9347	0,774	0,7281	0,9962	0,6245
0,2% Poli. Com Sj	0,1288	3,084	3,522	3,584	1,905		0,08605	0,08484	1	0,05824
0,1% Aço Sem Sp	4,581	1,447	0,7349	0,9161	2,44	4,447		1	0,2347	1
0,1% Aço Com Sp	4,569	1,614	0,9344	1,114	2,552	4,456	0,25		0,2215	1
0,2% Aço Sem Sp	0,572	2,383	2,857	2,883	1,24	0,6649	3,747	3,792		0,1614
0,2% Aço Com Sp	4,815	1,86	1,168	1,36	2,785	4,69	0,4963	0,2336	4,025	

Fonte: Autor, 2022.



## APÊNDICE B – AMOSTRAS MOLDADAS

Os resultados completos obtidos da análise de variância (ANOVA) e teste de Tukey da resistência à compressão axial de todas as amostras moldadas estão apresentadas na Figura 52.

Figura 52 – ANOVA e teste de Tukey da resistência à compressão axial das amostras moldadas.

Test for equal means					
	Sum of sqrs	df	Mean square	F	p (same)
<b>Between groups:</b>	7008,44	4	1752,11	23,53	7,898E-16
<b>Within groups:</b>	14224,3	191	74,4726		<b>Permutation p (n=99999)</b>
<b>Total:</b>	21232,7	195			1E-05
<b>Components of variance (only for random effects):</b>					
<b>Var(group):</b>	42,8286	<b>Var(error):</b>	74,4726	<b>ICC:</b>	0,365117
<b>omega<sup>2</sup>:</b>	0,3149				
<b>Levene's test for homogeneity of variance, from means</b>				<b>p (same):</b>	1,353E-05
<b>Levene's test, from medians</b>				<b>p (same):</b>	0,00114
<b>Welch F test in the case of unequal variances: F=18,7, df=92,65, p=2,687E-11</b>					
Tukey's Q below the diagonal, p(same) above the diagonal.					
Significant comparisons are pink.					
Copenhaver-Holland 1988 <input type="button" value="v"/>					
	Ref.	0,1% Poli.	0,2% Poli.	0,1% Aço	0,2% Aço
Ref.		0,9846	0,106	2,511E-05	1,358E-07
0,1% Poli.	0,7446		0,03195	0,0003204	3,124E-06
0,2% Poli.	3,469	4,125		2,94E-10	2,837E-13
0,1% Aço	6,858	6,01	9,989		0,8708
0,2% Aço	8,392	7,497	11,52	1,364	

Fonte: Autor, 2022.

Já os resultados completos da análise de variância (ANOVA) e teste de Tukey da resistência à tração na flexão de todas as amostras estão apresentados na Figura 53.

Figura 53 – ANOVA e teste de Tukey da resistência à tração na flexão das amostras moldadas.

Test for equal means					
	Sum of sqrs	df	Mean square	F	p (same)
Between groups:	563,767	4	140,942	40,41	4,156E-20
Within groups:	348,784	100	3,48784		Permutation p (n=99999)
Total:	912,551	104			1E-05
Components of variance (only for random effects):					
Var(group):	6,54542	Var(error):	3,48784	ICC:	0,652372
omega <sup>2</sup> :	0,6002				
Levene's test for homogeneity of variance, from means				p (same):	0,8226
Levene's test, from medians				p (same):	0,8591
Welch F test in the case of unequal variances: F=42,34, df=49,82, p=1,907E-15					
Bayes factor: 1,619E17 (decisive evidence for unequal means)					
Tukey's Q below the diagonal, p(same) above the diagonal.					
Significant comparisons are pink.					
Copenhaver-Holland 1988 ▾					
	Ref.	0,1% Poli.	0,2% Poli.	0,1% Aço	0,2% Aço
Ref.		1	6,468E-09	1,316E-10	1,215E-10
0,1% Poli.	0,139		4,095E-09	1,277E-10	1,215E-10
0,2% Poli.	9,675	9,814		0,6793	0,174
0,1% Aço	11,54	11,68	1,867		0,8891
0,2% Aço	12,84	12,98	3,167	1,299	

Fonte: Autor, 2022.

### APÊNDICE C – AMOSTRAS IMPRESSAS

Os resultados de análise de variância (ANOVA) e teste de Tukey da resistência à compressão axial de todas as amostras impressas são apresentadas na Figura 54 para a direção de carregamento do tipo 1 e Figura 55 para do tipo 2.

Figura 54 – ANOVA e teste de Tukey da resistência à compressão das amostras impressas com a direção de carregamento do tipo 1.

Test for equal means											
	Sum of sqrs	df	Mean square	F	p (same)						
Between groups:	800,82	9	88,98	4,612	6,907E-05						
Within groups:	1485,7	77	19,2949		Permutation p (n=99999)						
Total:	2286,52	86			4E-05						
Components of variance (only for random effects):											
Var(group):	8,26719	Var(error):	19,2949	ICC:	0,299948						
omega <sup>2</sup> :	0,272										
Levene's test for homogeneity of variance, from means					p (same):	0,03736					
Levene's test, from medians					p (same):	0,1615					
Welch F test in the case of unequal variances: F=10,44, df=24,6, p=1,891E-06											
Bayes factor: 386,6 (decisive evidence for unequal means)											
Tukey's Q below the diagonal, p(same) above the diagonal.											
Significant comparisons are pink.											
Copenhaver-Holland 1988											
	Ref. S/Spray	Ref. C/Spray	0,1% Poli. S/Spra	0,1% Poli. C/Spra	0,2% Poli. S/Spra	0,2% Poli. C/Spra	0,1% Aço S/Spray	0,1% Aço C/Spra	0,2% Aço S/Spra	0,2% Aço C/Spra	
Ref. S/Spray		0,7348	0,06151	0,925	0,7378	1	0,7228	1	7,666E-05		
Ref. C/Spray	2,542		0,9645	1	1	0,6989	0,9713	1	0,7766	0,161	
0,1% Poli. S/Spra	4,498	1,744		0,9919	0,9638	0,09156	0,3486	0,9673	0,1469	0,9051	
0,1% Poli. C/Spra	1,973	0,03812	1,403		1	0,8711	0,9914	1	0,8994	0,4362	
0,2% Poli. S/Spra	2,535	0,005634	1,749	0,04272		0,7014	0,9719	1	0,7787	0,1596	
0,2% Poli. C/Spra	0,6341	2,622	4,277	2,179	2,617		0,9997	0,6885	1	0,0005736	
0,1% Aço S/Spra	0,4976	1,688	3,374	1,416	1,682	0,9345		0,9687	0,9998	0,005757	
0,1% Aço C/Spra	2,569	0,02254	1,722	0,01972	0,02817	2,645	1,71		0,768	0,1667	
0,2% Aço S/Spra	0,5859	2,443	3,993	2,08	2,437	0,0149	0,8801	2,464		0,001896	
0,2% Aço C/Spra	7,307	3,935	2,058	3,175	3,941	6,557	5,623	3,913	6,086		

Fonte: Autor, 2022.

Figura 55 – ANOVA e teste de Tukey da resistência à compressão das amostras impressas com a direção de carregamento do tipo 2.

Test for equal means											
	Sum of sqrs	df	Mean square	F	p (same)						
Between groups:	149,144	9	16,5716	0,9279	0,5124						
Within groups:	678,675	38	17,8599		Permutation p (n=99999)						
Total:	827,82	47			0,5144						
Components of variance (only for random effects):											
Var(group):	-0,271218	Var(error):	17,8599	ICC:	-0,0154201						
omega <sup>2</sup> :	0										
Levene's test for homogeneity of variance, from means					p (same):	0,08159					
Levene's test, from medians					p (same):	0,3411					
Welch F test in the case of unequal variances: F=5,485, df=13,53, p=0,002755											
Bayes factor: 0,0458 (strong evidence for equal means)											
Tukey's Q below the diagonal, p(same) above the diagonal.											
Significant comparisons are pink.											
Copenhaver-Holland 1988											
	Ref. S/Spray	Ref. C/Spray	0,1% Poli. S/Spra	0,1% Poli. C/Spra	0,2% Poli. S/Spra	0,2% Poli. C/Spra	0,1% Aço S/Spray	0,1% Aço C/Spra	0,2% Aço S/Spra	0,2% Aço C/Spra	
Ref. S/Spray		1	0,4959	0,9991	0,9998	1	1	1	1	1	
Ref. C/Spra	0,2351		0,5266	0,9999	0,9995	1	1	1	1	1	
0,1% Poli. S/Spra	3,063	2,996		0,2961	0,9662	0,853	0,6461	0,6117	0,6432	0,4771	
0,1% Poli. C/Spra	1,034	0,7443	3,548		0,9802	0,994	0,9993	0,9973	0,9999	1	
0,2% Poli. S/Spra	0,8407	0,9629	1,711	1,574		1	1	1	0,9998	0,9977	
0,2% Poli. C/Spra	0,4959	0,6525	2,223	1,325	0,3476		1	1	1	0,9997	
0,1% Aço S/Spra	0,06897	0,2741	2,737	1,003	0,7255	0,3941		1	1	1	
0,1% Aço C/Spra	0,2182	0,4218	2,812	1,191	0,6611	0,3043	0,1257		1	1	
0,2% Aço S/Spra	0,1052	0,1038	2,744	0,8045	0,8296	0,5206	0,1546	0,283		1	
0,2% Aço C/Spra	0,5219	0,2766	3,105	0,4437	1,164	0,8814	0,535	0,6901	0,3609		

Fonte: Autor, 2022.

Já os resultados da análise de variância (ANOVA) e teste de Tukey da resistência à tração interfacial de todas as amostras impressas são apresentadas na Figura 56.

Figura 56 – ANOVA e teste de Tukey da resistência à interfacial das amostras impressas.

Test for equal means										
	Sum of sqrs	df	Mean square	F	$p$ (same)					
Between groups:	11,7457	9	1,30508	6,573	1,178E-07					
Within groups:	25,0187	126	0,198561		Permutation $p$ (n=99999)					
Total:	36,7644	135			1E-05					
Components of variance (only for random effects):										
Var(group):	0,0828669	Var(error):	0,198561	ICC:	0,294452					
$\omega^2$ :	0,2694									
Levene's test for homogeneity of variance, from means					$p$ (same):	0,5296				
Levene's test, from medians					$p$ (same):	0,6677				
Welch F test in the case of unequal variances: $F=8,555$ , $df=44,59$ , $p=2,687E-07$										
Tukey's Q below the diagonal, $p$ (same) above the diagonal.										
Significant comparisons are pink.										
Copenhaver-Holland 1988										
	Ref. S/Spray	Ref. C/Spray	0,1% Poli. S/Spra	0,1% Poli. C/Spra	0,2% Poli. S/Spra	0,2% Poli. C/Spra	0,1% Aço S/Spra	0,1% Aço C/Spra	0,2% Aço S/Spra	0,2% Aço C/Spra
Ref. S/Spray		0,9939	0,5622	1	0,0164	0,9999	0,008483	1	0,3301	0,411
Ref. C/Spray	1,357		0,3152	0,9844	0,0155	0,9569	0,007048	0,9997	0,9931	0,9929
0,1% Poli. S/Spra	2,907	3,442		0,9215	0,9783	0,9368	0,8462	0,559	0,0097	0,01604
0,1% Poli. C/Spra	0,5029	1,548	1,996		0,2203	1	0,106	0,9999	0,4239	0,4714
0,2% Poli. S/Spra	5,078	5,103	1,625	3,703		0,2082	0,9999	0,02966	4,268E-05	0,0001256
0,2% Poli. C/Spra	0,7809	1,807	1,924	0,1887	3,741		0,09911	0,9993	0,2535	0,3075
0,1% Aço S/Spra	5,361	5,438	2,262	4,155	0,8088	4,193		0,01382	3,095E-05	7,603E-05
0,1% Aço C/Spra	0,3998	0,9267	2,913	0,769	4,809	1,026	5,154		0,691	0,7309
0,2% Aço S/Spra	3,406	1,382	5,305	3,193	7,278	3,605	7,382	2,64		1
0,2% Aço C/Spra	3,221	1,385	5,088	3,092	6,921	3,461	7,089	2,553	0,07979	

Fonte: Autor, 2022.