

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA

**DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE DO DESEMPENHO DE ARGAMASSAS PARA
IMPRESSÃO 3D**

Pedro Henrique Cota Drumond
Magister Scientiae

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2024**

PEDRO HENRIQUE COTA DRUMOND

**DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE DO DESEMPENHO DE ARGAMASSAS PARA
IMPRESSÃO 3D**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientador: Diogo Silva de Oliveira

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2024**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

D795d
2024 Drumond, Pedro Henrique Cota, 1996-
Desenvolvimento e análise do desempenho de argamassas
para impressão 3d / Pedro Henrique Cota Drumond. – Viçosa,
MG, 2024.

1 dissertação eletrônica (102 f.): il. (algumas color.).

Inclui apêndices.

Orientador: Diôgo Silva de Oliveira.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa,
Departamento de Engenharia Civil, 2024.

Inclui bibliografia.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2024.731>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Argamassa - Propriedades mecânicas. 2. Impressão
tridimensional. I. Oliveira, Diôgo Silva de, 1988-.
II. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia
Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.
III. Título.

CDD 22. ed. 620.1353

PEDRO HENRIQUE COTA DRUMOND

**DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE DO DESEMPENHO DE ARGAMASSAS PARA
IMPRESSÃO 3D**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 21 de agosto de 2024.

Assentimento:

Pedro Henrique Cota Drumond
Autor

Diogo Silva de Oliveira
Orientador

Essa dissertação foi assinada digitalmente pelo autor em 14/11/2024 às 15:49:54 e pelo orientador em 19/11/2024 às 08:19:39. As assinaturas têm validade legal, conforme o disposto na Medida Provisória 2.200-2/2001 e na Resolução nº 37/2012 do CONARQ. Para conferir a autenticidade, acesse <https://siadoc.ufv.br/validar-documento>. No campo 'Código de registro', informe o código **A1T3.PW1G.R3WX** e clique no botão 'Validar documento'.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus, por toda força e sabedoria, tornando possível o desenvolvimento e a conclusão desta pesquisa.

Agradeço aos meus pais e minha família, por todo incentivo e apoio dado. Ao meu primo Matheus, por toda ajuda, compreensão e oportunidade.

Aos colegas do PPGEC, Camila Spagnol, João Victor, Paloma Parassen, Geysiane Milagres, Jean Emerick e Caio Lopes, pelo companheirismo e pelo apoio no desenvolvimento deste trabalho e por tornar os momentos de laboratório mais leves e divertidos.

Aos orientadores Diôgo Silva de Oliveira e José Maria Franco de Carvalho, pelo apoio não só no desenvolvimento deste trabalho, mas pelos ensinamentos além da área acadêmica, contribuindo significativamente para o meu desenvolvimento profissional e pessoal.

À Mírian Quintão Assis, por toda ajuda, companheirismo e paciência. Por ser esta pessoa incrível, incentivando o melhor em mim todos os dias.

Aos amigos feitos pelo caminho, por garantirem boas risadas e tornarem o dia a dia mais leve e divertido.

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

*“Quero melhorar em tudo. Sempre.”
(Ayrton Senna)*

RESUMO

DRUMOND, Pedro Henrique Cota, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, agosto de 2024. **Desenvolvimento e análise do desempenho de argamassas para impressão 3d**. Orientador: Diogo Silva de Oliveira.

A construção civil enfrenta desafios relacionados à produtividade e sustentabilidade, impulsionando a busca por novas tecnologias para aumentar a eficiência e reduzir o impacto ambiental. A manufatura aditiva de materiais cimentícios, surge como uma solução promissora, oferecendo precisão, flexibilidade de design, e economia de material. Este trabalho investiga o desenvolvimento e a análise do desempenho de argamassas específicas para impressão 3D, com foco nas suas propriedades no estado fresco e endurecido. Primeiramente foram realizados estudos detalhados sobre os materiais e aditivos utilizados, visando melhorar a reologia e as propriedades da impressão, como a construtibilidade e printabilidade. Nesta parte do estudo, através de traços já utilizados, foram analisadas e variadas algumas relações encontradas na argamassa, como cimento/filler, areia/finos e água finos a fim de avaliar e medir a construtibilidade e printabilidade obtida. Foi analisado também, através de um Planejamento de mistura utilizando o modelo estatístico de simplex centroide, diferentes quantidades de três aditivos: incorporador de ar, modificador de consistência e retardador de pega, de forma a avaliar também estas duas características de impressão, onde, através do modelo estatístico citado foi possível obter um ponto ótimo para o traço estudado. Por fim foi feita uma comparação entre a resistência mecânica de corpos de prova moldados e impressos, avaliando o tipo de corte, no estado fresco ou endurecido e a direção de impressão. Para o estado endurecido da argamassa, foram realizados ensaios de compressão uniaxial, tração na flexão, cisalhamento e arrancamento de camada, avaliando em todos estes a diferença do corte na argamassa no estado fresco e no estado endurecido. Para os ensaios de tração na flexão e cisalhamento foi avaliada também a influência da direção de impressão para cordões dispostos longitudinalmente e transversalmente à aplicação da carga, observando-se para o último caso, uma tendência de abertura de fissuras entre um cordão e outro. Por fim foi avaliada a influência dos materiais secos na construtibilidade e printabilidade bem como a influência de cada um dos aditivos. Para as proporções estudadas, a água e a areia afetaram diretamente na construtibilidade e printabilidade enquanto a variação do

filler influenciou pouco no comportamento da argamassa. Os aditivos incorporadores de ar e modificadores de consistência apresentaram uma boa performance na argamassa, tornando-a mais trabalhável para impressões, enquanto o retardador de pega tornou a argamassa muito fluida, atrapalhando as características de impressão. Argamassas com boa tixotropia demonstraram melhor desempenho, garantindo a retenção da forma durante e após o processo de impressão, desta forma, foi notado também que a elevação da tensão de cisalhamento máxima da argamassa acarreta no acréscimo da Construtibilidade. Quanto aos ensaios mecânicos, os corpos de prova moldados apresentaram resultados melhores que os impressos, porém dentro deste último, os corpos de prova conformados no estado fresco apresentaram resultados piores do que os cortados no estado endurecido. Os resultados mostram que a definição de um traço ideal, incluindo a proporção de cimento, agregados, e aditivos, são cruciais para otimizar a printabilidade e a construtibilidade das argamassas. Adicionalmente, a pesquisa contribui para a sustentabilidade na construção civil ao propor formulações de argamassas com menor teor de cimento, substituindo-o por materiais de reaproveitamento, como o filler de rocha ornamental utilizado.

Palavras-chave: 3dpc; impressão de argamassa; caracterização da argamassa; desempenho no estado fresco; filler de granito; 3dpm

ABSTRACT

DRUMOND, Pedro Henrique Cota, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, August, 2024. **Development and Performance Analysis of Mortars for 3D Printing.** Adviser: Diogo Silva de Oliveira.

The construction industry faces challenges related to productivity and sustainability, driving the search for new technologies to increase efficiency and reduce environmental impact. Additive manufacturing of cementitious materials emerges as a promising solution, offering precision, design flexibility, and material savings. This work investigates the development and performance analysis of specific mortars for 3D printing, focusing on their properties in both fresh and hardened states. Initially, detailed studies were conducted on the materials and additives used, aiming to improve rheology and printing properties such as buildability and printability. In this part of the study, using pre-existing mix designs, some proportions in the mortar, such as cement/filler, sand/fines, and water/fines, were analyzed and adjusted to evaluate and measure the resulting buildability and printability. A mixture design, utilizing the simplex centroid statistical model, was applied to test different amounts of three additives: air-entraining agent, consistency modifier, and setting retarder, also to evaluate these two printing characteristics, where the statistical model enabled the identification of an optimal mix point. Finally, a comparison was made between the mechanical strength of molded and printed specimens, assessing the cutting type, in the fresh or hardened state, and the printing direction. In the hardened state, uniaxial compression, flexural tensile, shear, and layer pull-off tests were conducted, evaluating in each the differences in mortar cutting at fresh and hardened states. For the flexural tensile and shear tests, the influence of printing direction was also assessed for cords aligned longitudinally and transversely to the applied load, with the latter showing a tendency for crack opening between cords. Lastly, the influence of dry materials on buildability and printability, as well as the effect of each additive, was evaluated. For the studied proportions, water and sand directly affected buildability and printability, while filler variation had little influence on mortar behavior. Air-entraining and consistency-modifying additives showed good performance, making the mortar more workable for printing, while the setting retarder made it too fluid, compromising printing characteristics. Mortars with good thixotropy demonstrated better

performance, retaining shape during and after printing; thus, it was noted that increasing the maximum shear stress of the mortar enhances buildability. In mechanical tests, molded specimens showed better results than printed ones; however, within the printed category, specimens cut in the fresh state showed poorer results than those cut in the hardened state. The results indicate that defining an ideal mix, including the proportion of cement, aggregates, and additives, is crucial to optimizing mortar printability and buildability. Additionally, this research contributes to sustainability in construction by proposing mortar formulations with lower cement content, substituting it with repurposed materials, such as the ornamental rock filler used.

Keywords: 3dpc; mortar printing; mortar characterization; fresh state performance; granite filler; 3dpm

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO GERAL	11
1.1 Contextualização	11
1.2 Objetivos	12
1.2.1 Objetivo geral	12
1.2.2 Objetivo específico	12
1.3 Revisão bibliográfica	13
1.3.1 Caracterização da argamassa	14
1.3.2 Características da argamassa no processo de impressão	16
1.3.3 Ensaios mecânicos em argamassas impressas	23
1.4 Justificativa	26
1.5 Estrutura da dissertação	27
1.6 Referências	28
CAPÍTULO 2: AVALIAÇÃO DOS MATERIAIS E ADITIVOS NA PRINTABILIDADE E CONSTRUTIBILIDADE DE ARGAMASSAS PARA IMPRESSÃO 3D	34
2.1 Introdução	35
2.2 Materiais e métodos	38
2.2.1 Materiais utilizados	39
2.2.2 Estudo dos materiais sólidos na printabilidade e construtibilidade	42
2.2.3 Estudo dos aditivos na printabilidade e construtibilidade	43
2.2.4 Definição do traço ótimo	44
2.2.5 Avaliação da construtibilidade	45
2.2.6 Avaliação da printabilidade	46
2.2.7 Reologia	46
2.3 Resultados	48
2.3.1 Influência de cada material seco do traço	48
2.3.2 Influência de cada aditivo	52
2.3.3 Definição do traço ótimo	56
2.3.4 Reologia	56
2.4 Conclusões	61
2.5 Referências	62
CAPÍTULO 3: COMPORTAMENTO MECÂNICO DA ARGAMASSA PARA IMPRESSÃO 3D COM DIFERENTES PADRÕES DE IMPRESSÃO 66	
3.1 Introdução	67

3.2	Materiais e métodos.....	68
3.2.1	Caracterização dos materiais	69
3.2.2	Produção dos corpos de prova	71
3.2.3	Ensaio mecânicos	74
3.3	Resultados.....	76
3.3.1	Ensaio de resistência à compressão.....	76
3.3.2	Ensaio de resistência à tração na flexão	77
3.3.3	Ensaio de resistência ao cisalhamento	78
3.3.4	Ensaio de aderência entre camadas	80
3.3.5	Comparação entre corpos de prova.....	81
3.4	Conclusões	82
3.5	Referências	84
CAPÍTULO 4: CONCLUSÕES GERAIS		88
4.1	Sugestões para trabalhos futuros	89
APÊNDICE A: DETALHES DOS CORPOS DE PROVA IMPRESSOS...		90
APÊNDICE B: RESULTADOS DOS ENSAIOS MECÂNICOS NOS CORPOS DE PROVA		99

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO GERAL

1.1 Contextualização

O setor da construção civil possui longo histórico de baixa produtividade em comparação ao desenvolvimento tecnológico de outros setores industriais, apresentando muitas vezes trabalhos que podem ser comparados a trabalho de artesãos, gerando grande variação de resultado dependendo do profissional que está executando o serviço, acarretando assim, um grande desperdício de material e de resíduos. Além de todo o material descartado, o setor é responsável por 40% do carbono liberado na atmosfera devido ao processo de fabricação do cimento e pela operação e manutenção dos edifícios (Abanda; Tah; Cheung, 2017; Perrot; Amziane, 2019; Rubin, 2021).

A manufatura aditiva de materiais cimentícios é um método novo e promissor que permite construir moradias através de um arquivo digital (Ma; Li; Wang, 2018). O material já misturado, após a adição de água, é adicionado à impressora e extrudado através de um bocal com dimensão conhecida (Gao *et al.*, 2015), construindo assim cordões de argamassa que juntos componham um objeto.

Na impressão de objetos utilizando materiais cimentícios o traço é um dos itens mais importantes, de forma que, uma argamassa com boa trabalhabilidade e com consistência adequada para o equipamento resultará em boas construtibilidade e printabilidade (Carbonari *et al.*, 2023). Há alguns tipos diferentes de impressoras 3D capazes de imprimir estes materiais pastosos, porém são 2 os modelos mais utilizados: impressora tipo pórtico e braços articulados pivotantes. O primeiro tipo possibilita impressões maiores, uma vez que alterando as dimensões do pórtico, é possível realizar construções dentro deste, enquanto o segundo modelo tem como principal vantagem a possibilidade de realizar outras tarefas, como acabamentos como rebocos, pinturas e montagens (Formiga; Carneiro, 2021).

Apesar da fabricação digital ter a vantagem da economia de material (devido a otimização de forma e preenchimento), uma das grandes dificuldades é estabelecer uma argamassa otimizada com um baixo teor de ligantes, se tornando mais sustentável (De Bono *et al.*, 2024). Drumond *et al.*, (2023) estudaram a presença de finos em argamassas para impressão 3D. Em um dos traços experimentados utilizou *filler* de rocha ornamental para substituir uma parte do cimento, fazendo com que a argamassa se comportasse de maneira tão bem quanto à construtibilidade e printabilidade em comparação à argamassa com alto teor de cimento.

Desta forma, para a impressão 3D, o estudo do concreto e a escolha dos materiais concentram-se principalmente na determinação das propriedades tanto no estado fresco quanto no estado endurecido. Isso ocorre porque os parâmetros de impressão, como o tamanho do bico da impressora, a pressão de extrusão, a velocidade de impressão, além do tamanho e formato do elemento, são características cruciais. Além disso, o material cimentício utilizado precisa ter resistência suficiente para garantir a estabilidade da peça tanto durante a fase de impressão quanto na sua utilização final. Um material cimentício adequado deve ser moldável e extrudável, ter boa fluidez, um tempo de pega apropriado, baixa retração e alta resistência mecânica (Nerella; Hempel; Mechtcherine, 2019).

Após a impressão, o concreto ou argamassa começam a ganhar resistência e rigidez e, diferente de um concreto convencional, o concreto imprimível normalmente possui alto teor de cimento, ligantes alternativos, aditivos químicos e agregados de dimensões menores, geralmente limitados em 2 mm (Buswell *et al.*, 2018; Wangler *et al.*, 2019). Em estruturas convencionais de concreto armado, uma das principais propriedades a ser estudada é a sua resistência à compressão, determinada pelo projetista da estrutura (Padilha, 2020). Já em objetos impressos, é importante se atentar a diferentes características, como a direção e velocidade de impressão, a consistência do material, dentro outros. Portanto, se faz necessário investigar o material tanto no estado fresco, avaliando a construtibilidade, printabilidade e fatores que influenciam nestas características. Já no estado endurecido, é importante avaliar os fatores mecânicos como a resistência à compressão, flexão e tração, à interação das resistências entre as camadas, preferencialmente avaliadas em mais de uma direção de impressão.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Definir os valores de parâmetros para impressão 3D de argamassa através da análise do comportamento reológico para a definição de um traço e comparação mecânica de corpos de prova utilizando argamassa impressa e moldada.

1.2.2 Objetivo específico

- a. definir um traço ótimo adequado para a argamassa a ser utilizada na impressora do Laboratório de Estruturas da Universidade Federal de Viçosa;
- b. definir a porcentagem ótima de aditivo para ser utilizado na impressora do Laboratório de Estruturas da Universidade Federal de Viçosa;

- c. parametrizar o processo de impressão e calibração da impressão;
- d. caracterizar as propriedades da argamassa de impressão, no estado fresco e endurecido;
- e. correlacionar as propriedades mecânicas de corpos de provas impressos e moldados comparando ainda com os dois tipos de corte: fresco e endurecido.

1.3 Revisão bibliográfica

Ao realizar uma busca na base de dados Scopus utilizando o *script* “(3dpc OR (*print** AND *concrete*) OR (*print** AND *mortar*)) AND ((*printability* OR *constructability* OR *rheology*) OR (“*mechanical tests*” OR “*Mechanical properties*” OR “*Hard* properties*” OR “*compressive strength*”))” no título, palavras chaves e *abstract*, onde foram retornados 1,757 documentos. Destes, foram filtrados por área, marcando apenas ciência dos materiais e engenharia, reduzindo assim a busca a 1,637 documentos. Destes, foram exportados em formato .RIS para o *software VOSviewer*, onde é realizado uma contagem completa das palavras buscadas. foram selecionados a aparição mínima de 20 repetições para a palavra ser selecionada, separando 579 palavras, sendo que destas foram mostradas na tela as 60% mais relevantes, totalizando 358 termos. Ao final ainda foi feito um filtro manual das palavras que não estavam relacionadas a palavras chaves.

Na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** estão identificadas as principais palavras c haves separadas por cores (*clusters*), de forma que as palavras com cores iguais possuem correlação entre si, sendo identificado 3 principais cores: azul, vermelho e verde. Desta forma, é possível observar que na cor azul está a palavra com maior ocorrência (*study*) estando esta correlacionada com todos os outros *clusters*. Esta cor está relacionada a estudos feitos na impressão 3D, com pesquisas, simulações de elementos finitos, simulações numéricas entre outros. Em vermelho estão as palavras ligadas ao material utilizado para impressão e suas características, como argamassa, cimento, reologia, printabilidade, construtibilidade, entre outros. Por último, em verde, estão as palavras voltadas para a caracterização mecânica da argamassa, possuindo palavras como corpos de prova, anisotropia, direção (de impressão), padrão de impressão, entre outros.

Os estudos estão voltados para a o desenvolvimento de uma impressão 3D industrializada e sustentável, buscando incorporar materiais que seriam descartados, como agregados reciclados, visando avaliar a melhora destes na reologia e no comportamento da argamassa. Ao

1.3.1.1 Traços de argamassas para impressão 3D utilizados na literatura

Tabela 1.1 - Traços experimentais utilizados em outros trabalhos.

Autor	Dosagem		Ensaio realizado	Resultado
Chen <i>et al.</i> (2019)	cimento : filler : argila calcinada 1 : argila calcinada 2 : areia			
	MIX-L	1:0,5:1:0:3,75	T	T- 147 min
	MIX-M	1:0,5:0,75:0,25:3,75		T-78 min
	MIX-H	1:0,5:0,5:0,5:3,75		T-52 min
Kaszyńska; Skibicki; Hoffmann, (2020)	cimento: cinza volante : sílica : filler : areia			
	B840/SF/FA/LP	1:0,29:0,14:0,42:1,68	P e M	M-17,88 kPa
	B640/SF/FA/LP	1:0,29:0,14:0,70:2,81		M-5,28 kPa
B640/SF/FA	1:0,29:0,14:0,00:3,50	M-3,30kPa		
Lucen <i>et al.</i> (2024)	cimento : areia : sílica ativa			
	SF0	1:1:0	C	C-7 camadas
	SF2	1:1,02:0,02		C-10 camadas
	SF5	1:1,05: 0,05		C-16 camadas
	SF0-C	1:1:0 + CO ₂		C-13 camadas
	SF2-C	1:1,02:0,02 + CO ₂		C->33 camadas
Zou <i>et al.</i> (2021)	cimento : areia natural : areia reciclada			
	M1	1:1:0	C	C-262mm
	M3	1:0:1		C-299mm
	M5	1:0:1		C-298mm
Ma; Li; Wang (2018)	cimento : areia : rejeito de mineração : cinza volante : sílica ativa			
	R0	1 : 1,71 : 0 : 0,29 : 0,14	C e M	C-138mm
	R10	1 : 1,54 : 0,17 : 0,29 : 0,14		C-140mm
	R20	1 : 1,37 : 0,34 : 0,29 : 0,14		C-120mm
	R30	1 : 1,2 : 0,51 : 0,29 : 0,14		C-117mm
	R40	1 : 1,03 : 0,69 : 0,29 : 0,14		C-83mm
	R50	1 : 0,86 : 0,86 : 0,29 : 0,14		C-72mm
Joh <i>et al.</i> (2020a)**	cimento : areia : sílica ativa : cinza volante			
	E1	1 : 2 : 0,14 : 0,3	C e M	C-19 camadas
	E2			C-49 camadas
	E3			C-29 camadas
	E4			C-22 camadas
	E5			C-28 camadas
	E6			C-33 camadas
	E7			C-52 camadas
	E8			C-52 camadas
	E9			C-52 camadas
	E10			C-52 camadas
Drumond <i>et al.</i> (2023)***	cimento : areia: filler			
	N	1:2,21	C e P	C-7 camadas
	F	1:2,21:1,21		C-9 camadas
	C	1:1		C-9 camadas
<p>Legenda:</p> <p>*o autor realizou variação de aditivos, mantendo o mesmo traço;</p> <p>** variou o formato do corpo de prova e seu preenchimento;</p> <p>***estudo realizado na UFV.</p> <p>C – Ensaio de Construtibilidade.</p> <p>M – Ensaio mecânicos.</p> <p>P – Ensaio de Printabilidade.</p> <p>T– Ensaio de tempo de abertura.</p>				

Fonte: o autor.

É possível observar a falta de parametrização para avaliação da printabilidade, bem como a falta de padronização da forma de mostrar os resultados da construtibilidade. Alguns autores apresentam o número de camadas empilhadas, alguns o tamanho do corpo de prova e outros apresentam em forma de tensão das camadas superiores ou de tempo. É notável também a presença na maioria dos traços de rejeitos e materiais finos, como *fillers* e sílica ativa, tornando a argamassa com melhor preenchimento de vazios, visando o aumento do empacotamento de partículas e melhora na construtibilidade da argamassa.

1.3.1.2 Propriedades da argamassa no estado fresco

A maioria dos processos de impressão não utiliza formas (de madeira ou metálicas) para suportar o peso do material em estado fresco, sendo necessário a argamassa para a manufatura aditiva possuir características antagônicas: ser fluida para passar pela extrusão e coesa o suficiente para manter a forma após impressa (Wangler *et al.*, 2019). Desta maneira, após sua deposição, a argamassa deve possuir o comportamento de um material semissólido, capaz de suportar o seu peso próprio e das camadas subsequentes (Padilha, 2020).

Sabendo da importância do comportamento da argamassa no estado fresco, o estudo do material cimentício é crucial para determinar a tensão de escoamento inicial e a viscosidade, bem como a sua evolução com o tempo. Essa análise é complexa, uma vez que os protocolos convencionais como o uso da *flow table* e o reômetro rotativo geram a destruição da estrutura do material, fornecendo, em alguns casos, um resultado incorreto e impreciso (Wangler *et al.*, 2019). Uma das formas de melhorar as propriedades da argamassa no estado fresco é através da presença de materiais com pequena granulometria. Estudos indicam que a distribuição do tamanho das partículas dos agregados, como as areias, influencia diretamente o comportamento físico e mecânico das argamassas. A utilização de partículas finas pode aumentar a compacidade da mistura, resultando em melhor desempenho físico e mecânico da argamassa, incluindo maior resistência à compressão e menor absorção de água (Ferreira *et al.*, 2023; Liao *et al.*, 2021; Tandon; Stengel, 2023). Um estudo realizado por Drumond *et al.* (2023) constatou que a presença de finos na composição da argamassa influenciou diretamente na construtibilidade, permitindo um maior empilhamento de camadas (construtibilidade) e de melhor acabamento superficial (printabilidade).

1.3.2 Características da argamassa no processo de impressão

A impressora 3D de argamassa segue o mesmo processo de manufatura aditiva de impressoras tradicionais, nas quais normalmente são extrudados os termoplásticos, sendo o

objeto confeccionado pelo depósito de material camada por camada (Birosz; Andó, 2023). A principal diferença entre elas reside na solidificação do material extrudado: os termoplásticos solidificam-se rapidamente, enquanto o material cimentício demora algumas horas para ficar rígido. Dada essa característica do endurecimento tardio, o traço da argamassa deve ser muito bem definido de forma a garantir construtibilidade, printabilidade, extrudabilidade e bombeabilidade. Além disso, deve manter a massa cimentícia trabalhável tempo suficiente para ser colocada na extrusora e fazer com que, após expelida, endureça o mais rápido possível, garantindo que as camadas seguintes sejam impressas em uma base firme e coesa, que não se deforme com o peso das camadas sobrejacentes.

1.3.2.1 Construtibilidade

A construtibilidade é a capacidade do material de ser depositado camada sobre camada (Alami, A. H. *et al.*, 2023) no qual consiste na capacidade de resistir às tensões causadas pelas camadas superiores sem o colapso do objeto (Zou *et al.*, 2021). É uma característica determinante para a altura do objeto a ser impresso, uma vez que à medida que o a impressão avança, as tensões causadas pelas cargas gravitacionais aumentam (Wangler *et al.*, 2019). Assim, para o caso de objetos altos, uma argamassa com baixa construtibilidade não permitirá a impressão destes com sucesso, sem que sejam realizadas pausas na impressão para que as camadas de base se solidifiquem. A sua importância é dada principalmente para impressão de objetos pequenos, de forma que, em itens grandes, como edificações, é um fator um pouco menos relevante, já que o tempo gasto para a cabeça de impressão voltar ao ponto de partida poderá ser suficiente para iniciar o tempo de pega da argamassa.

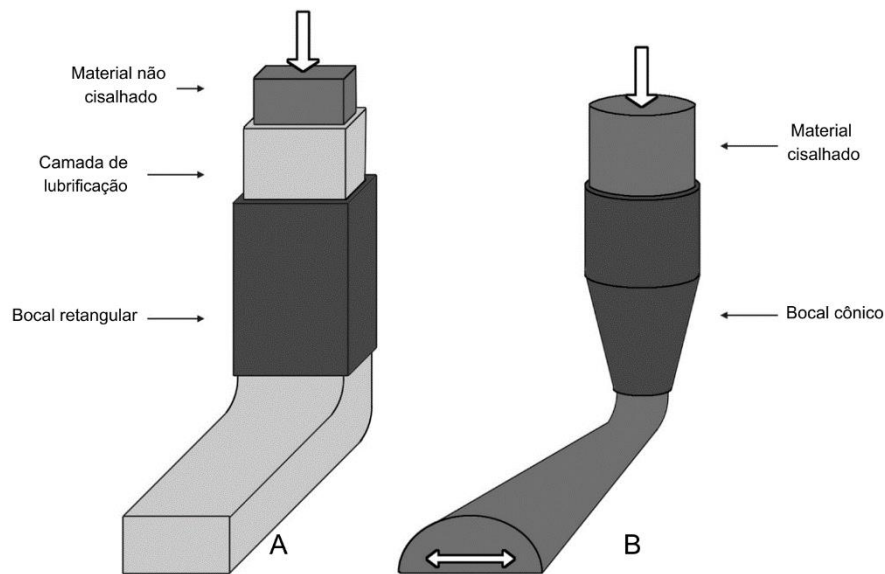
1.3.2.2 Printabilidade

A printabilidade é mensurada de forma qualitativa após o material passar pela extrusão e se diz respeito ao acabamento superficial do cordão impresso (Hasse *et al.*, 2020), sendo uma característica que possui a avaliação do material subjetiva. Para uma boa printabilidade, o cordão de argamassa deve ser coeso e contínuo, sem variação em seu formato ou na quantidade de material expelido. A partir do momento em que a impressão está saindo com falhas, muitas bolhas e espaçada, define-se como uma printabilidade ruim. De acordo com Ribeiro (2021), um fator importante para proporcionar uma boa printabilidade é a granulometria do material, de forma que, para proporcionar uma consistência ideal e preencher os microporos de uma argamassa, é recomendado a utilização de materiais mais finos do que a areia, como os *fillers*.

A printabilidade depende também do método de deposição de material, ou regime de fluxo, que pode ser de dois tipos: laminar e não laminar. No regime de fluxo laminar, também

conhecido como tijolinhos infinitos, o bocal não afeta o formato do material e não gera cisalhamento na argamassa. Já no regime de fluxo não laminar, o material sofre forças de cisalhamento ao passar pelo bocal e ser conformado (normalmente ocorre em bocais cônicos) (Wangler *et al.*, 2019). Na Figura 1.2 é possível observar as diferenças entre os dois métodos de deposição de material, na esquerda (a) os tijolinhos infinitos e na direita (b) o regime de fluxo não laminar.

Figura 1.2 - Diferença entre os processos de deposição de material: bico quadrado(a) e bico cônico (b).



Fonte: Adaptado de Roussel (2018).

De acordo com Wangler *et al.* (2019), o bocal de seção retangular não é afetado pelo fluxo ou pela gravidade e permite um bom controle da geometria do cordão. No bocal cônico, a argamassa sofre cisalhamento ao ser afunilada pelo bocal, de forma que o cordão impresso depende diretamente da ação da gravidade e de tensão de escoamento do material. Intuitivamente deduz-se que o bocal circular irá gerar uma dificuldade de equilíbrio quando a próxima camada for impressa.

1.3.2.3 Extrudabilidade

A maioria dos processos de impressão em desenvolvimento utilizam o processo de extrusão do material cimentício (Wangler *et al.*, 2019), fazendo com que a argamassa apresente boa extrudabilidade. A extrudabilidade é a capacidade do concreto, ou da argamassa, de ser extrudado e depende diretamente do comportamento reológico do material, da sua fluidez e do projeto da impressora (Rubin, 2021).

No processo de extrusão de materiais, há um risco significativo de segregação das fases, o que pode afetar a consistência da massa durante a impressão. A velocidade de rotação do fuso deve ser cuidadosamente controlada para evitar esse efeito. A segregação ocorre quando as diferentes componentes do material começam a se separar, resultando em uma mistura inconsistente. Estudos destacam a importância de otimizar a velocidade do fuso para manter a homogeneidade e a qualidade do material impresso (Chen *et al.*, 2023).

1.3.2.4 Avaliação dos processos de impressão

Atualmente não há um ensaio padrão para avaliar a construtibilidade do material impresso, porém é possível avaliar alguns trabalhos já realizados, como Le *et al.* (2012), que realizaram o ensaio com diversos corpos de prova retos e lineares variando algumas características de impressão. Nesse trabalho, foi avaliado a influência da quantidade de aditivo plastificante no traço, bem como o número de filetes que compõem o corpo de prova. Com isso, foi possível concluir que quanto maior a quantidade de filetes paralelos de cordões, maior será estabilidade e, portanto, a construtibilidade.

Outro experimento foi o realizado por Zou *et al.* (2021) que realizaram a impressão de círculos de 300 mm de diâmetro e avaliaram não só a altura máxima e quantidade de camadas para o colapso como a deformação vertical média causada pela sobrecarga das camadas superiores.

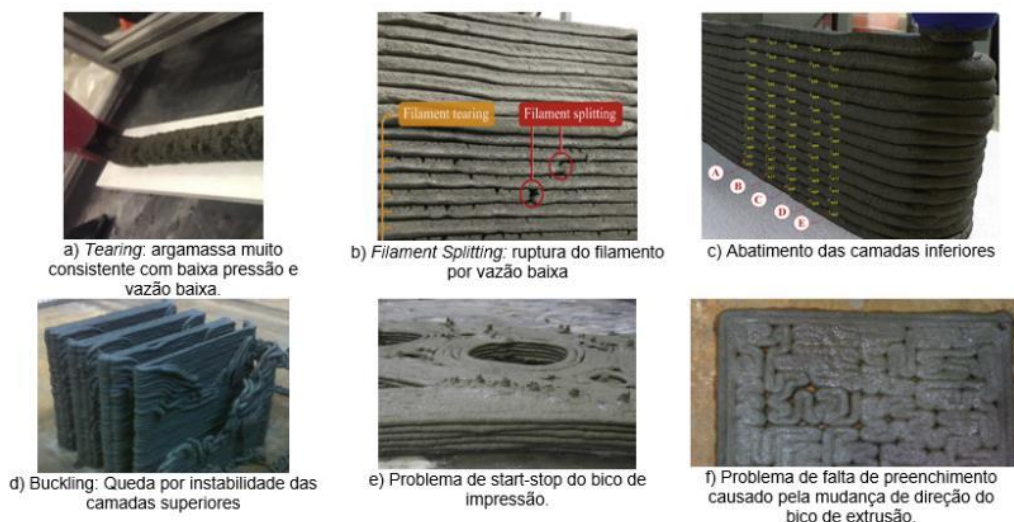
1.3.2.5 Patologias

Assim como todo processo construtivo, a manufatura aditiva de argamassa também possui patologias, de forma que estas afetam a usabilidade, printabilidade e até mesmo a construtibilidade do objeto impresso. Na Figura 1.3 Buswell *et al.* (2018) apontam as principais patologias que podem ocorrer no processo de impressão de argamassa 3D: a) *Tearing*; b) *Filament Splitting*; c) abatimento das camadas inferiores; d) *Buckling*; e) problema de *Start-Stop* e f) problema de falta de preenchimento.

O *Tearing* normalmente ocorre quando a velocidade de impressão não está ajustada para o fluxo que a impressora consegue imprimir, fazendo com que a argamassa apresente uma aparência áspera, apresentando rasgos na superfície (Joh *et al.*, 2020).

O *Filament Splitting* está presente quando há a separação do cordão de impressão, apresentando uma falha neste processo, geralmente ocorre devido à falta de coesão da argamassa (Ahmed; Askandar; Jumaa, 2022).

Figura 1.3 - Patologias associadas ao processo de impressão 3D.



Fonte: Adaptado de Buswell et al. (2018).

O abatimento das camadas inferiores ocorre quando as camadas de base não suportam o peso das camadas superiores, ocorrendo principalmente quando a argamassa apresenta baixa tensão de cisalhamento (Al-Tamimi *et al.*, 2023; Quah *et al.*, 2023).

O *Buckling* é caracterizado pela curvatura ou flexão das camadas impressas e ocorre normalmente quando há o excesso de extrusão ou quando há instabilidade localizada no objeto impresso (Alami, A. H. *et al.*, 2023; Joh *et al.*, 2020)(Joh *et al.*, 2020).

O problema de *Start-Stop* está relacionado com o processo de fatiamento da impressão e ocorre quando a impressora necessita parar e começar a imprimir durante o preenchimento da forma, causando relevos na superfície superior (Gao *et al.*, 2024).

Por último, o problema de falta de preenchimento está relacionado com a falta de extrusão, fazendo com que os cordões impressos não se fundam corretamente, podendo ocasionar problemas na resistência mecânica do objeto (Al-Tamimi *et al.*, 2023).

Na construtibilidade, o colapso pode ocorrer de duas formas: local e global. O colapso local (*Buckling*) ocorre normalmente em objetos esbeltos e não maciços, por instabilidade localizada da parede. Na Figura 1.4 é possível notar esse fenômeno com clareza, de forma que apenas na região indicada com as setas houve a instabilidade, enquanto o restante da estrutura se manteve no prumo.

O colapso global ocorre normalmente por instabilidade estrutural ou falta de resistência das camadas de base, caracterizado pelo esmagamento dos primeiros cordões. Na Figura 1.5 é indicado pelas setas vermelhas o abatimento da base, bem como a plastificação da argamassa, caracterizando a ruptura e limite de impressão para o traço de argamassa testado.

Figura 1.4 - Colapso local do objeto impresso.



Fonte: Drumond *et al.* (2023).

Figura 1.5 - Colapso global do objeto impresso.



Fonte: Drumond *et al.* (2023).

1.3.2.6 Trabalhabilidade e janela de impressão

Uma das formas de avaliar a trabalhabilidade e viscosidade da argamassa é através de ensaios reológicos, de forma que a reologia é uma prática que tem ganhado tendência nos ambientes laboratoriais que trabalham com pastas para buscar compreender e esclarecer as propriedades dos materiais no estado fresco (Silvestro *et al.*, 2024). A reologia dos materiais cimentícios está relacionada a diversas propriedades das argamassas, como a estabilidade (referente à segregação), compactidade (que envolve densidade e empacotamento das partículas) e fluidez (influenciada pelo atrito entre partículas, viscosidade e coesão) (Banfill, 1991). A impressão 3D é uma tecnologia que depende de diversas características reológicas dos materiais cimentícios, sendo a reologia necessária para controlar e entender a fluidez e compactidade do material e definir os limites de cada impressora (Silvestro *et al.*, 2024).

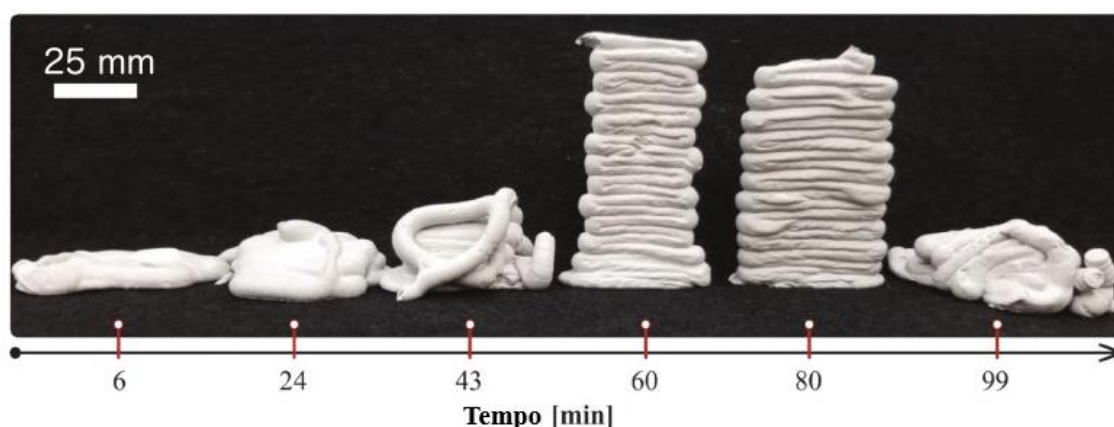
A trabalhabilidade de uma massa cimentícia para impressão 3D é definida como o tempo disponível de trabalho desde a adição da água para que a mistura comece a ficar firme e entrar no tempo de pega (Alami, A. H. *et al.*, 2023). O tempo é um fator muito importante para a impressão 3D, definindo não só a trabalhabilidade como também a resistência mecânica. Wolfs, Bos e Salet (2019) realizaram ensaios de aderência entre camadas com tempos de 15 segundos, 1, 4, 7 e 24 horas entre uma camada e outra. Em todas as impressões que demoraram horas entre uma camada e outra houve redução na aderência entre camadas.

O tempo de pega é extremamente importante para determinar quanto tempo após o início da hidratação do cimento se tem para trabalhar a argamassa (Kopeckó; Baranyi, 2022; Liu *et al.*, 2024). Na literatura há alguns métodos de avaliar este tempo de trabalho, de forma que o mais utilizado é a leitura do cisalhamento através do reômetro, na qual a pasta é submetida ao cisalhamento em diversos tempos de hidratação.

A manufatura aditiva de materiais pastosos possui uma característica específica quando utiliza o cimento para ganhar resistência, que é possuir uma janela de impressão que permita o material manter suas propriedades de bombeabilidade, extrudabilidade e printabilidade. Este período de tempo em que se pode trabalhar o material está diretamente ligado a evolução da sua rigidez e perda de fluidez ao longo do tempo (Buswell *et al.*, 2018; Le *et al.*, 2012; Malaeb; AlSakka; Hamzeh, 2019; Wangler *et al.*, 2016).

A janela de impressão pode passar a contar desde o momento de hidratação ou, em alguns casos específicos, a partir de um certo tempo. Na Figura 1.6 é possível observar um material que possui uma janela de impressão entre 60 e 80 minutos, de forma que, em tempos fora deste intervalo apresenta desmoronamento e colapso do objeto impresso.

Figura 1.6 – Janela de impressão em material cimentício com adição de pó de calcário.



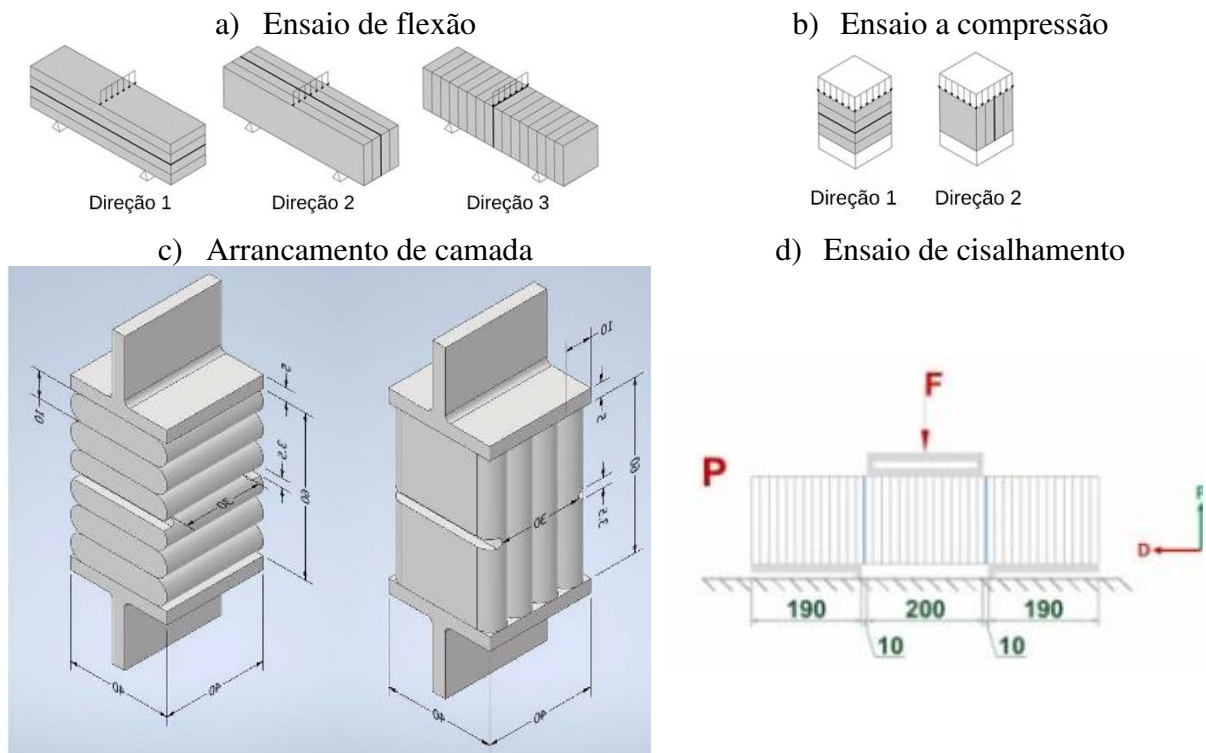
Fonte: Adaptado de Buswell *et al.* (2018).

1.3.3 Ensaios mecânicos em argamassas impressas

A direção de impressão em objetos impressos em 3D influencia diretamente alguns aspectos mecânicos das peças, como as resistências à compressão, flexão, cisalhamento e a resistência entre as camadas. Essa característica anisotrópica é essencial para se entender e otimizar as propriedades do concreto impresso para aplicações estruturais. Estudos mostraram que a força de adesão entre camadas impressas pode ser afetada por parâmetros do processo de impressão, como a velocidade do bico, taxa de estruturação e o tempo de intervalo entre camadas (Joh *et al.*, 2020; Richter; Jungwirth, 2023). Kruger e Van Zijl (2021) avaliaram também que alguns autores notaram que esta característica pode ser considerada ortotrópica dependendo do ensaio que está sendo realizada.

Na Figura 1.7 é possível observar alguns ensaios realizados por alguns autores: a) ensaio de flexão e b) realizados por Wolfs; Bos e Salet (2019); c) ensaio de arrancamento de camada realizado por e d) ensaio de cisalhamento realizado por Bayrak *et al.*, (2024).

Figura 1.7 - Ensaios mecânicos realizados por alguns autores.



Fonte: Adaptado de Bayrak *et al.*, (2024), Christen; *et al.* (2022) e Wolfs; Bos e Salet (2019).

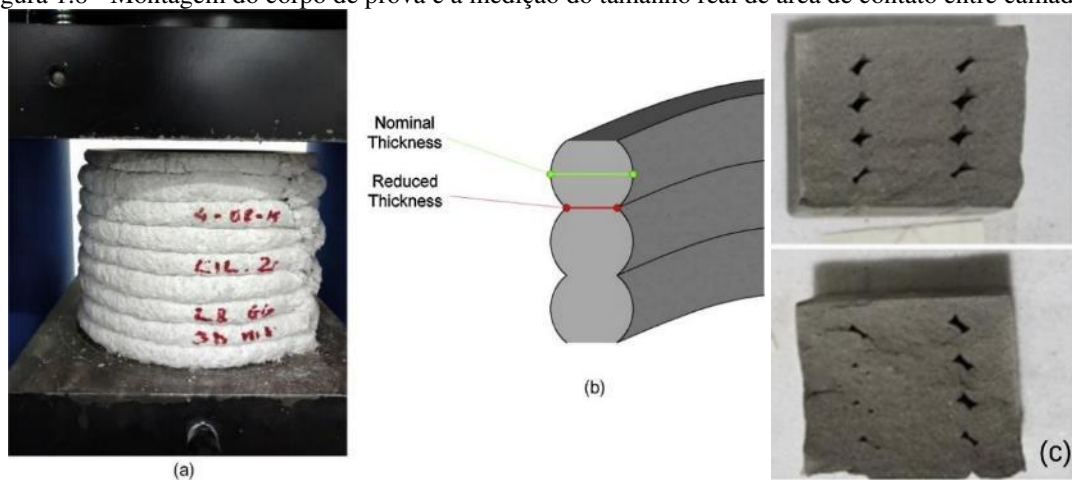
O ensaio de compressão uniaxial é o mais recorrente e um dos mais simples entre os ensaios de caracterização mecânica do material, de maneira que, através de uma área conhecida é aplicada uma força em sentido transversal calculando a tensão característica, fazendo a razão

entre a força e a área. Apesar de ser um ensaio simples, em materiais cimentícios impressos é complexo produzir um corpo de prova maciço que não possua vazios entre cordões, uma vez que corpos de prova maciços possuem vãos entre os cordões e corpos de provas com um cordão único possuem o formato arredondado, tornando árduo o processo de definir a área de aplicação de força. Na Figura 1.8 é possível observar em (a) a montagem do corpo de prova na máquina universal de ensaios, em (b) a preocupação dos autores em aferir a menor seção do corpo de prova em contato entre camadas para cálculo da área comprimida de argamassa e em (c) os vazios entre cordões.

O ensaio de flexão é comumente utilizado para determinação da tensão de tração na argamassa, normatizado pela ABNT NBR 13279:2005 e utilizado nas impressões 3D de materiais cimentícios para avaliar a influência da aderência lateral das camadas e o sentido de impressão (Bayrak *et al.*, 2024; Bos *et al.*, 2019).

O ensaio de arrancamento de camada é realizado aplicando uma tensão de tração a corpos de prova, similar ao proposto pela ABNT NBR 13755:2017. Na Figura 1.9 está demonstrado o experimento proposto e realizado por Rubin (2021a), de maneira que duas chapas metálicas foram coladas a um corpo de prova e assim, aplicado a força para gerar o deslocamento.

Figura 1.8 - Montagem do corpo de prova e a medição do tamanho real de área de contato entre camadas.



Fonte: Adaptador de Asprone *et al.* (2018) e Hou *et al.* (2023).

A tensão de cisalhamento possui certa dificuldade na realização do ensaio, a norma BS EN 1052 - 3:2002 estabelece alguns parâmetros para ensaio de cisalhamento em argamassa e Licciardello *et al.* (2021) adaptaram este ensaio para a realização de cisalhamento entre camadas, de forma que as tensões de cisalhamento fossem aplicadas para favorecer o rompimento entre as camadas do material impresso. Bayrak *et al.* (2024) por sua vez, realizaram

ensaio em corpos de provas prismáticos de maiores dimensões. Na Figura 1.10 é demonstrado os ensaios realizados nos dois estudos.

Tabela 1.2 - Traços experimentais utilizados em outros trabalhos, ensaios mecânicos e resultados.

Autor	Nomenclatura	Dimensões	Tipo de corte	Resultado (Mpa)			
				Com	Fle	Cis	Aec
Tao <i>et al.</i> (2020)	S1-LP0	Não informou	Não Informou	50	9	-	-
	S1-LP25			7	8	-	-
	S1-LP50			6	8	-	-
	S2-LP0			42	8	-	-
	S2-LP25			36	6	-	-
	S2-LP50			14	2	-	-
Lucen <i>et al.</i> (2024)	SF0	5x5x5 cm	Corte endurecido	69	-	-	-
	SF1			71	-	-	-
	SF2			75	-	-	-
	SF5			71	-	-	-
Ma; Li; Wang (2018)	R0	Não informou	Corte endurecido	44	-	-	-
	R10			43	-	-	-
	R20			45	-	-	-
	R30			47	5,4	-	-
	R40			53	-	-	-
	R50			44	-	-	-
(Bayrak <i>et al.</i> , 2024)	CAST	Com – 10x16 cm	Corte endurecido	37,8	3,0	3,9	-
	U _P			35,1	2,5	3,7	-
	U _{D-D}			30,8	3,6	-	-
	U _{D-S}	Fle – Não informou		34,5	3,6	-	-
	U _T			22,7	2,4	-	-
	L _P			50,6	2,5	3,7	-
	L _{D-D}	Cis – Não informou		53,2	3,6	-	-
	L _{D-S}			58,9	3,6	-	-
	L _T			47,3	2,4	-	-
(Rubin, 2021)	TREF	Com – 4x4x4 cm	Corte fresco	57,4	14,9	-	2,98
	T2AC	Fle – 4x4x16 cm		46,9	14,1	-	3,67
	T4AC	Aec – 5x4x5 cm		56,4	17,5	-	3,56
Joh <i>et al.</i> (2020a)	Mono	Com – 4x4x4 cm Fle – 4x4x16 cm	Corte Endurecido	72,8	11,9	-	-
	D1			23,5	6,5	-	-
	D1-M			24,6	18,5	-	-
	D2			31	6,1	-	-
	D2-M			24	11,0	-	-
Legenda:							
Com – compressão;							
Fle – Flexão;							
Cis – Cisalhamento;							
Aec – Arrancamento entre camadas.							

Fonte: o autor.

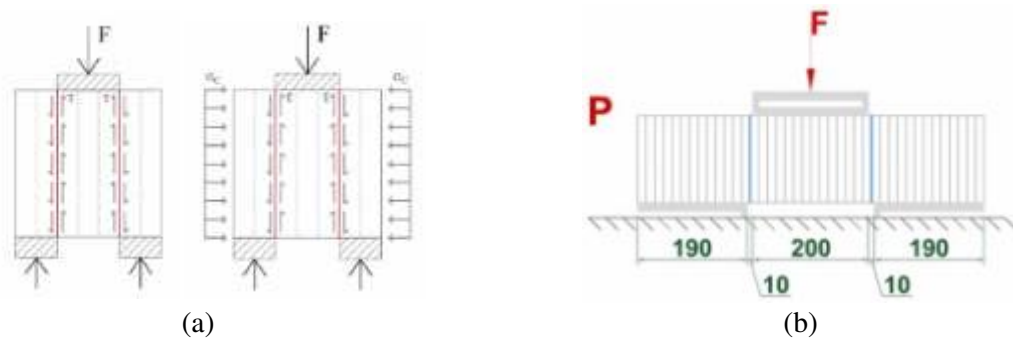
Como é possível observar na Tabela 1.2, não há uma padronização do tipo de corte no objeto para ser ensaiado, deixando em dúvida qual metodologia deve ser usada bem como se algum dos métodos gera mais dano ao corpo de prova em comparação ao outro.

Figura 1.9 - Ensaio de arrancamento de camada realizado por Rubin (2021a).



Fonte: Rubin (2021a).

Figura 1.10 – Ensaio de cisalhamento realizados por (a) Licciardello *et al.* (2021) e (b) Bayrak *et al.* (2024).



Fonte: Adaptado de Licciardello *et al.* (2021) e Bayrak *et al.* (2024).

1.4 Justificativa

Apesar de ser uma tecnologia emergente e nova, há diversos estudos sobre a manufatura aditiva de materiais, entre estes, materiais cimentícios. Apesar do grande número de estudos relacionados, os artigos levantados na Tabela 1.1 demonstram que nenhum dos autores realizou estudos sobre a printabilidade dos elementos impressos, característica importante principalmente para garantir um bom acabamento do objeto. Já na Tabela 1.2 é observado a ausência de estudos que realizaram os quatro tipos de ensaios mecânicos: compressão, tração na flexão, cisalhamento e arrancamento de camadas. Desta maneira, não foi encontrado um estudo que contemple os quatro ensaios quanto à caracterização mecânica do material estudado, principalmente comparando corpos de prova moldados e impressos, tornando a caracterização da argamassa incompleta quanto aos esforços que podem incidir sobre uma estrutura.

Desta forma, este estudo é justificado pela necessidade de desenvolver argamassas com propriedades adequadas para impressão 3D, que combinem boa trabalhabilidade no estado fresco com resistência adequada no estado endurecido, possuindo baixo teor de ligantes a fim de tornar a técnica mais sustentável. Busca-se estudar também a influência dos materiais do traço nas argamassas imprimíveis, avaliando a influência destes nos parâmetros de printabilidade, construtibilidade e na reologia da argamassa. Outro importante fator estudado é a influência do tipo de conformação dos corpos de prova impressos, quanto ao corte no estado fresco e no estado endurecido, de forma que na Tabela 1.2 é possível notar a presença dos dois tipos de moldagem, não deixando claro se o método de deixar na forma desejada influencia na perda de resistência final. Ao tratar dos quatro principais tipos de ensaios mecânicos, este estudo apresenta uma avaliação robusta dos principais esforços que podem incidir sob uma estrutura de uma edificação quanto a sua utilização e sobrecargas naturais.

1.5 Estrutura da dissertação

Esta dissertação está estruturada em quatro Capítulos e dois apêndices.

No CAPÍTULO 1, apresenta-se a contextualização do objeto de estudo, identificando as principais dificuldades de se trabalhar com materiais cimentícios impressos, e os principais estudos já realizados. Encontra-se também os objetivos do trabalho, justificativa e a estruturação da dissertação.

Os capítulos 2 e 3 estão estruturados em quatro tópicos: Introdução, Materiais e métodos, Resultados e conclusões.

No CAPÍTULO 2 é apresentado o estudo sobre a avaliação dos traços, no qual são apresentados os traços e os métodos avaliativos para classificar a impressão como boa ou ruim. Neste capítulo é realizado também a otimização e identificação de um traço ótimo, para atingir as melhores configurações de printabilidade e construtibilidade. Adicionalmente é realizado um estudo reológico, a fim de estabelecer relações entre os resultados de construtibilidade e a tensão de cisalhamento máxima da argamassa.

No CAPÍTULO 3 apresenta-se o estudo de resistência mecânica de corpos de prova impressos e moldados com a argamassa ótima obtida no capítulo anterior, no qual este é avaliado em diferentes ensaios, como compressão, flexão, cisalhamento e arrancamento de camadas. É avaliada também a influência da direção de impressão e do método de conformação dos corpos de prova impressos, cortando-os no estado fresco e no estado endurecido.

No CAPÍTULO 4 estão resumidas as conclusões gerais da dissertação bem como indicações de pesquisas futuras.

No APÊNDICE A são apresentados os detalhes dos corpos de prova impressos, permitindo melhor visualização dos detalhes de cada argamassa.

No APÊNDICE B apresenta-se os resultados na íntegra dos ensaios mecânicos dos corpos de prova.

1.6 Referências

ABANDA, H.; TAH, J.; CHEUNG, F. BIM in Off-site Manufacturing for Buildings. **Journal of Building Engineering**, [s. l.], v. 14, 2017.

AHMED, G. H.; ASKANDAR, N. H.; JUMAA, G. B. A review of largescale 3DCP: Material characteristics, mix design, printing process, and reinforcement strategies. **Structures**, [s. l.], v. 43, p. 508–532, 2022.

AL-TAMIMI, A. K. *et al.* Framework of 3D Concrete Printing Potential and Challenges. **Buildings**, [s. l.], v. 13, n. 3, p. 827, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2075-5309/13/3/827>. Acesso em: 10 jul. 2024.

ALAMI, A. H. *et al.* 3D Concrete Printing: Recent Progress, Applications, Challenges, and Role in Achieving Sustainable Development Goals. **Buildings**, [s. l.], v. 13, n. 4, 2023.

ASPRONE, D. *et al.* 3D printing of reinforced concrete elements: Technology and design approach. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 165, p. 218–231, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13279:2005, : Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à compressão, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR13755, : Revestimentos cerâmicos de fachadas e paredes externas com utilização de argamassa colante — Projeto, execução, inspeção e aceitação — Procedimento, 2017.

BANFILL, P. Rheology of Fresh Cement and Concrete. **Rheol Rev**, [s. l.], 1991.

BAYRAK, A. T. *et al.* Spatial variation of physical, mechanical, and thermophysical properties of 3D printed concrete across a full-scale wall. **Construction and Building Materials**, [s. l.],

v. 431, p. 136574, 2024. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S095006182401715X>. Acesso em: 27 jun. 2024.

BIROSZ, M. T.; ANDÓ, M. Simplified local infill size optimization for FDM printed PLA parts. **Scientific Reports**, [s. l.], v. 13, n. 1, 2023.

BOS, F. P. *et al.* The influence of material temperature on the in-print strength and stability of a 3d print mortar. *In:* , 2019. **Advances in Engineering Materials, Structures and Systems: Innovations, Mechanics and Applications - Proceedings of the 7th International Conference on Structural Engineering, Mechanics and Computation, 2019**. [S. l.: s. n.], 2019. p. 425–430.

BRITISH STANDARD. BS EN 1052-3:2002. Methods of test for masonry - Part 3: Determination of initial shear strength. **London: BSI**, [s. l.], 2002. p. 18.

BUSWELL, R. A. *et al.* 3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 112, p. 37–49, 2018.

CARBONARI, L. T. *et al.* Impressão 3d com materiais cimentícios: uma análise comparativa de projetos residenciais: 3d printing with cementitious materials: a comparative analysis of residential projects. **MIX Sustentável**, [s. l.], v. 9, n. 4 SE-Científica, p. 27–39, 2023. Disponível em: <https://ojs.sites.ufsc.br/index.php/mixsustentavel/article/view/6083>.

CHEN, H. *et al.* A Review of the Extruder System Design for Large-Scale Extrusion-Based 3D Concrete Printing. **Materials**, [s. l.], v. 16, n. 7, p. 2661, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1944/16/7/2661>. Acesso em: 8 jul. 2024.

CHEN, Y. *et al.* Limestone and Calcined Clay-Based Sustainable Cementitious Materials for 3D Concrete Printing: A Fundamental Study of Extrudability and Early-Age Strength Development. **Applied Sciences**, [s. l.], v. 9, n. 9, p. 1809, 2019. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3417/9/9/1809>. Acesso em: 24 jun. 2024.

CHRISTEN, H.; VAN ZIJL, G.; DE VILLIERS, W. The incorporation of recycled brick aggregate in 3D printed concrete. **Cleaner Materials**, [s. l.], v. 4, 2022.

DE BONO, V. *et al.* Methodology for formulating low-carbon printable mortar through particles packing optimization. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 176, p. 107403, 2024.

DRUMOND, P. *et al.* Utilização de resíduo de rocha ornamental como filler em argamassa para

impressão 3D. *In:* , 2023. **Congresso Sul-Americano de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade**. [S. l.: s. n.], 2023. p. 1–10.

FERREIRA, R. L. S. *et al.* Effects of Particle Size Distribution of Standard Sands on the Physical-Mechanical Properties of Mortars. **Materials**, [s. l.], v. 16, n. 2, p. 844, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1944/16/2/844>. Acesso em: 8 jul. 2024.

FORMIGA, C. V. E.; CARNEIRO, M. L. Impressão 3D para construção civil: revisão da literatura e desafios. **Revista de Engenharia e tecnologia**, [s. l.], v. V13 n.4, 2021. Disponível em: <https://revistas.uepg.br/index.php/ret/article/view/19632/209209216044>. Acesso em: 10 nov. 2023.

GAO, T. *et al.* Research on 3D Printing Craft for Flexible Mass Customization: The Case of Chengdu Agricultural Expo Center BT - Design for Rethinking Resources. *In:* , 2024, Cham. (M. R. Thomsen, C. Ratti, & M. Tamke, Org.) **Anais [...]**. Cham: Springer International Publishing, 2024. p. 465–480.

GAO, W. *et al.* The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering. **Computer-Aided Design**, [s. l.], v. 69, p. 65–89, 2015.

HASSE, J. A. *et al.* Increasing structuration rate of 3D printable concretes: the effect of viscosity enhancing admixtures. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, [s. l.], v. 13, n. 4, p. e13412, 2020. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1983-41952020000400211&tlng=en. Acesso em: 7 jun. 2024.

HOU, S. *et al.* Mechanical properties and pore structure of 3D printed mortar with recycled powder. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 394, p. 132068, 2023.

JOH, C. *et al.* Buildability and Mechanical Properties of 3D Printed Concrete. **Materials**, [s. l.], v. 13, n. 21, p. 4919, 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1944/13/21/4919>. Acesso em: 24 jun. 2024.

KASZYŃSKA, M.; SKIBICKI, S.; HOFFMANN, M. 3D Concrete Printing for Sustainable Construction. [s. l.], v. 13, n. 23, p. 6351, 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/13/23/6351/htm>. Acesso em: 18 jun. 2023.

KOPECSKÓ, K.; BARANYI, A. Comparative Study of Setting Time and Heat of Hydration Development of Portland Cement According to EN 196-3. *In:* RIVERA-ARMENTA, J. L.;

FLORES-HERNÁNDEZ, C. G. (org.). Rijeka: IntechOpen, 2022. p. Ch. 4. Disponível em: <https://doi.org/10.5772/intechopen.101912>.

KRUGER, J.; VAN ZIJL, G. A compendious review on lack-of-fusion in digital concrete fabrication. **Additive Manufacturing**, [s. l.], v. 37, p. 101654, 2021.

LE, T. T. *et al.* Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, [s. l.], v. 45, n. 8, p. 1221–1232, 2012. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1617/s11527-012-9828-z>. Acesso em: 26 maio 2023.

LIAO, Y. *et al.* Particle Size Effect of Oyster Shell on Mortar: Experimental Investigation and Modeling. **Materials**, [s. l.], v. 14, n. 22, p. 6813, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1944/14/22/6813>. Acesso em: 8 jul. 2024.

LICCIARDELLO, L. *et al.* Investigation of the Structural and Thermal Behaviour of 3D Printed Concrete Walls. *In:* , 2021. **fib Symposium**. [S. l.: s. n.], 2021. p. 319–325.

LIU, B. *et al.* Evaluation of Workability and Mechanical Properties in Cement Mortar after Compounding Igneous Rock Powder and Silica Fume. **Buildings**, [s. l.], v. 14, p. 359, 2024.

LUCEN, H. *et al.* The synergistic effect of greenhouse gas CO₂ and silica fume on the properties of 3D printed mortar. **Composites Part B: Engineering**, [s. l.], v. 271, p. 111188, 2024.

MA, G.; LI, Z.; WANG, L. Printable properties of cementitious material containing copper tailings for extrusion based 3D printing. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 162, p. 613–627, 2018.

MALAEB, Z.; ALSAKKA, F.; HAMZEH, F. 3D Concrete Printing: Machine Design, Mix Proportioning, and Mix Comparison Between Different Machine Setups. **3D Concrete Printing Technology: Construction and Building Applications**, [s. l.], p. 115–136, 2019.

NERELLA, V. N.; HEMPEL, S.; MECHTCHERINE, V. Effects of layer-interface properties on mechanical performance of concrete elements produced by extrusion-based 3D-printing. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 205, p. 586–601, 2019.

PADILHA, V. Z. Avaliação das propriedades mecânicas de elementos de concreto produzidos por impressão 3D. [s. l.], 2020. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/216463>. Acesso em: 3 jun. 2023.

PERROT, A.; AMZIANE, S. 3D Printing in Concrete: General Considerations and Technologies. *In: [S. l.: s. n.]*, 2019. p. 1–40.

QUAH, T. K. N. *et al.* Concrete 3D Printing: Process Parameters for Process Control, Monitoring and Diagnosis in Automation and Construction. **Mathematics**, [s. l.], v. 11, n. 6, p. 1499, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2227-7390/11/6/1499>. Acesso em: 24 jun. 2024.

RIBEIRO, M. J. A extrudabilidade das pastas cerâmicas no processo de conformação plástica. [s. l.], n. May, 2021. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/351480517_A_extrudabilidade_das_pastas_ceramicas_no_processo_de_conformacao_plastica.

RICHTER, C.; JUNGWIRTH, J. 3D Concrete Printing – from Mechanical Properties to Structural Analysis BT - Building for the Future: Durable, Sustainable, Resilient. *In: , 2023, Cham. (A. Ilki, D. Çavunt, & Y. S. Çavunt, Org.)Anais [...]*. Cham: Springer Nature Switzerland, 2023. p. 201–210.

ROUSSEL, N. Rheological requirements for printable concretes. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 112, p. 76–85, 2018.

RUBIN, A. P. **Influência da taxa de estruturação nas propriedades reológicas, físicas e mecânicas de concretos para impressão 3D (3DCP)**. 2021. 266 f. - UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA, [s. l.], 2021. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/227270>.

SEDGHI, R.; RASHIDI, K.; HOJATI, M. Large-scale 3D wall printing: From concept to reality. **Automation in Construction**, [s. l.], v. 159, p. 105255, 2024.

SILVESTRO, L. *et al.* Rotational rheometry test of Portland cement-based materials – A systematic literature review. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 432, p. 136667, 2024.

TANDON, K.; STENGEL, T. Scatter of Coal Fly Ash Properties and Effect of Particle Size and Shape on Fresh and Hardened Mortar Performance BT - Building for the Future: Durable, Sustainable, Resilient. *In: , 2023, Cham. (A. Ilki, D. Çavunt, & Y. S. Çavunt, Org.)Anais [...]*. Cham: Springer Nature Switzerland, 2023. p. 1030–1039.

TAO, Y. *et al.* Effect of Limestone Powder Substitution on Fresh and Hardened Properties of

3D Printable Mortar BT - Second RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication. *In:* , 2020, Cham. (F. P. Bos et al., Org.) **Anais [...]**. Cham: Springer International Publishing, 2020. p. 135–143.

WANGLER, T. *et al.* Digital Concrete: A Review. **Cement and Concrete Research**, [*s. l.*], v. 123, p. 105780, 2019.

WANGLER, T. *et al.* Digital Concrete: Opportunities and Challenges. **RILEM Technical Letters**, [*s. l.*], v. 1, p. 67, 2016.

WOLFS, R. J. M.; BOS, F. P.; SALET, T. A. M. Hardened properties of 3D printed concrete: The influence of process parameters on interlayer adhesion. **CEMENT AND CONCRETE RESEARCH**, THE BOULEVARD, LANGFORD LANE, KIDLINGTON, OXFORD OX5 1GB, ENGLAND, v. 119, p. 132–140, 2019.

WOLFS, R. J. M. J. M.; BOS, F. P. P.; SALET, T. A. M. A. M. Hardened properties of 3D printed concrete: The influence of process parameters on interlayer adhesion. **Cement and Concrete Research**, [*s. l.*], v. 119, p. 132–140, 2019.

ZOU, S. *et al.* On rheology of mortar with recycled fine aggregate for 3D printing. **Construction and Building Materials**, [*s. l.*], v. 311, p. 125312, 2021.

CAPÍTULO 2: AVALIAÇÃO DOS MATERIAIS E ADITIVOS NA PRINTABILIDADE E CONSTRUTIBILIDADE DE ARGAMASSAS PARA IMPRESSÃO 3D

Pedro Henrique Cota Drumond¹

¹Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 36570-900, Brasil.

RESUMO

A manufatura aditiva de materiais cimentícios tem se mostrado mais presente nas pesquisas e na construção civil pelo mundo. Algumas pesquisas indicam que a presença de materiais finos, como os *fillers* e sílica ativa, melhoram algumas características da argamassa para impressão, como a printabilidade e a construtibilidade, assim como o uso de aditivos. Desta forma, o estudo de traços é necessário para avaliar individualmente a influência dos materiais e dos aditivos no comportamento reológico da argamassa além de buscar entender a interferência destes na previsibilidade dos parâmetros de impressão. Este estudo visa também criar parâmetros para avaliar a printabilidade, característica que, até então, era apresentada de forma exclusivamente qualitativa, tornando difícil mensurar este parâmetro em outros traços. A partir de alguns traços previamente desenvolvidos na UFV foram constatadas algumas relações entre os materiais, como cimento/*filler*, areia/finos e água finos, onde a partir dos traços originais foram variados para avaliar a sua influência na construtibilidade (número de camadas empilhadas) e printabilidade (HRAP). Foi avaliado também a través de um método estatístico de análise de mistura simplex centroide as quantidades ideais de aditivos a serem utilizados, avaliando entre os aditivos modificadores de consistência, incorporador de ar e retardador de pega quais as proporções usar para se obter a melhor argamassa. Os resultados mostraram que a quantidade de água é crucial para a fluidez da argamassa, afetando diretamente construtibilidade. Traços com maiores concentrações de areia apresentaram melhor construtibilidade, porém podem deixar o material demasiadamente coeso, sendo incapaz de ser trabalhado pela impressora, enquanto o filler teve pouca influência nas proporções testadas. Em relação aos aditivos, altas concentrações de retardadores de pega aumentaram a fluidez excessivamente, prejudicando a printabilidade. Através análise estatística de dosagem de misturas (rede *simplex*), identificou a combinação de aditivos que proporcionou o melhor equilíbrio entre construtibilidade e printabilidade. A análise reológica mostrou uma forte correlação entre a tensão de cisalhamento e os parâmetros de impressão, com a reologia se mostrando mais eficaz que o índice de consistência na previsão da construtibilidade da argamassa. Por fim o traço ótimo foi estabelecido com 0,67% de Stabi520 e 0,28% de Air200 em relação à massa de cimento, atingindo uma construtibilidade de 8 camadas e uma printabilidade adequada.

Palavras-chave: 3DPC; Ensaio reológico; Resíduo de granito; Impressão de argamassa.

2.1 Introdução

A manufatura aditiva de materiais cimentícios, também conhecida como impressão 3D de concreto, está se tornando cada vez mais comum na construção civil como uma alternativa aos métodos tradicionais. Esta tecnologia inovadora oferece vantagens significativas, incluindo aumento da produtividade e redução de custos, tanto em termos de materiais quanto de mão de obra (Pegna, 1997). Além disso, a impressão 3D em argamassa promove maior sustentabilidade e eficiência energética, permitindo a criação de projetos com geometrias complexas que seriam difíceis de alcançar com técnicas convencionais. A manufatura aditiva também facilita uma melhor adaptação à arquitetura funcional e à construção modular, proporcionando maior flexibilidade e personalização nos projetos de construção (Bos *et al.*, 2016; Robayo-Salazar *et al.*, 2023; Şahin *et al.*, 2021; Silva; De Brito; Dhir, 2014).

A impressão de materiais cimentícios é considerada uma tecnologia recente, uma vez que, foi idealizada por Joseph Pegna (Pegna, 1997) em 1997 e aprimorada e desenvolvida por Behrokh Khoshnevis (Khoshnevis, 2004) em 2004 para a impressão de grandes objetos através de um pórtico deslizante, gerando, após a sua pesquisa, um interesse crescente das pesquisas e indústria pelo concreto imprimível (3DPC) para reduzir custos e economizar recursos, tendo assim um apelo econômico e ambiental (Han *et al.*, 2021; Weng *et al.*, 2020).

De acordo com um levantamento realizado por Buswell *et al.* (2018)., a maioria das impressoras utilizam o processo de extrusão de material, sendo este um cordão contínuo com diâmetro que varia de 6 mm a 50 mm, de maneira que a argamassa é bombeada para o bocal que normalmente está montado em um braço robótico ou um pórtico, depositando o material nas coordenadas programadas. Os autores verificaram haver similaridades entre as pesquisas, sendo apresentadas na maioria das pesquisas argamassas com alto teor de cimento e com o tamanho máximo de agregado de 2 a 3 mm, apesar de que em raras ocasiões agregados maiores também foram utilizados (Buswell *et al.*, 2018).

A manufatura aditiva de materiais cimentícios tem como principais características a construção *free-of-formwork* (livre de formas) e aplicação *layer-upon-layer* (camada sobre camada) e essas características em questão colocam como prioridade o desafio do desenvolvimento de traços imprimíveis, de maneira a buscar a otimização e equilíbrio de suas propriedades no estado fresco, a sua printabilidade e a sua construtibilidade (Lim *et al.*, 2012; Lu *et al.*, 2019; Mohan *et al.*, 2021; Zou *et al.*, 2021).

A Printabilidade é uma característica qualitativa da impressão, que retrata a capacidade do material ser impresso, produzindo um filamento uniforme e condizente com o produto esperado, sendo referente principalmente ao acabamento superficial do cordão (Hasse *et al.*, 2020). Kazemian *et al.* (2017) sugerem testes de impressão que envolvem análises visuais e de medição para determinação da qualidade da camada. Deve-se ajustar a velocidade de impressão com o fluxo de material extrudado. Quando a viscosidade se torna incompatível com o fluxo e pressão de extrusão definidos, começa a faltar material, gerando falhas na impressão, como a ruptura do cordão (*Filament Splitting*) ou baixa extrusão (*tearing*).

Por sua vez, a Construtibilidade está associada à capacidade de o material ser empilhado em camadas (Zou *et al.*, 2021). Kazemian *et al.* (2017) apontam que essa característica está associada ao peso do material, peso das camadas e pressão de extrusão, variáveis estas determinantes para a definição do número de camada que podem ser empilhadas sem que se tenha um abatimento das camadas inferiores ou instabilidade dos cordões de topo.

Outro desafio encontrado é a capacidade e necessidade de conciliar alta capacidade portante, poupando a utilização de formas para manter o formato impresso e evitando deformações com o próprio peso, com a capacidade de manter a argamassa fluida por tempo suficiente, evitando juntas frias entre camadas e permitindo um maior tempo de trabalhabilidade (Hasse *et al.*, 2020).

A estabilidade do objeto impresso, bem como a manutenção do formato impresso por deformações do peso próprio, é dependente de dois fatores distintos: a tensão vertical que atua nas camadas previamente depositadas e a resistência ao escoamento do material. Estes dois parâmetros estão correlacionados com o tempo, de forma que, o primeiro depende da velocidade de impressão, determinando a taxa de construção e a velocidade em que cada camada é depositada e a segunda está relacionada a uma característica da própria argamassa e do seu traço, de modo que o formato dos grãos e a composição granulométrica da argamassa influenciam diretamente neste comportamento (Menna *et al.*, 2020; Roussel, 2018; Wangler *et al.*, 2016).

Sabendo dos desafios que é o incremento na capacidade de empilhamento de camadas da manufatura aditiva, é necessário além do estudo do comportamento do traço da argamassa, compreender como ocorre a modificação reológica de matrizes cimentícias. Para este fim, podem ser utilizados aditivos, usados em concretos para algumas finalidades, entre elas reduzir

a segregação e exsudação no material (Hasse *et al.*, 2020; Khayat, 1998; Leemann; Winnefeld, 2007).

Dentro os tipos de aditivos existentes no mercado, alguns possuem propriedades que geram modificações na argamassa de interesse para a impressão 3D, como o aditivo incorporador de ar, modificador de consistência e retardador de pega. O aditivo incorporador de ar é composto por substância surfactante capazes de incorporar no concreto microbolhas de ar de forma uniformemente dispersa na argamassa, de forma que para a impressão 3D contribui com a melhora na trabalhabilidade e é eficiente na mitigação da segregação e exsudação (Mendes, 2016). Outro aditivo que possui propriedades interessantes para a manufatura aditiva é o estabilizador de consistência que, assim como o aditivo anterior, possui propriedade de reduzir a tendência de exsudação em matrizes cimentícias, uns importantes agentes estabilizadores são os amidos, podendo ser de diferentes fontes, como mandioca, milho, batata, etc. Os amidos afetam as interações entre partículas e podem modificar a tensão de cisalhamento do sistema, aumentando a estruturação da argamassa e promovendo maior resistência no estado fresco e aumentando a trabalhabilidade (Schmidt *et al.*, 2013).

Na Tabela 2.1 é possível observar alguns traços impressos por alguns autores, a maioria dos pesquisadores avaliam a alteração somente no traço seco, sem realizar a variação dos aditivos. Outra característica possível de notar é a ausência de parametrização de avaliação do parâmetro de printabilidade quando se avalia também a construtibilidade, de forma que poucos autores avaliam esta característica, voltando a atenção dos estudos apenas para o empilhamento de camada.

Desta forma, é identificado a falta de estudos na definição da argamassa, visto que cada impressora necessita do seu próprio traço e cada impressora possui uma capacidade de impressão diferente, já que a pressão da extrusora é diferente para cada caso. Nesse sentido, o presente trabalho visa propor a criação de traços de argamassa avaliando conjuntamente a printabilidade e a construtibilidade. Este estudo, de modo adicional, traz novos olhares que buscaram encontrar dosagens de aditivos que possam melhorar as características da argamassa para impressão 3D.

Tabela 2.1 - Traços experimentais impressos em outros trabalhos.

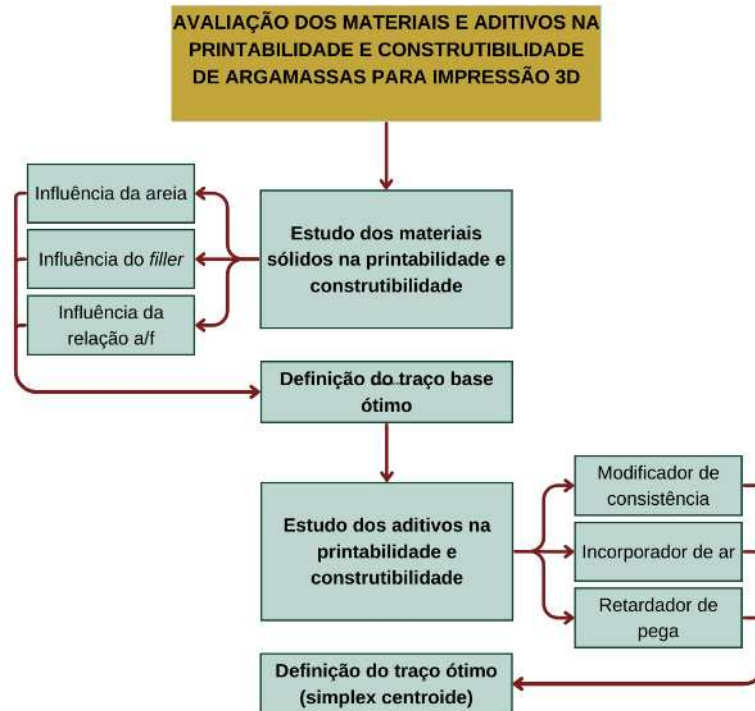
Autor	Dosagem		Ensaio realizado	Resultado	
	Traço	cimento : areia : sílica ativa			
Lucen <i>et al.</i> (2024)	SF0	1:1:0	C	C-7 camadas	
	SF2	1:1,02:0,02		C-10 camadas	
	SF5	1:1,05: 0,05		C-16 camadas	
	SF0-C	1:1:0 + CO ₂		C-13 camadas	
	SF2-C	1:1,02:0,02 + CO ₂		C->33 camadas	
Zou <i>et al.</i> (2021)	Dosagem		Ensaio realizado	Resultado	
	Traço	cimento : areia natural : areia reciclada			
	M1	1:1:0			C-262mm
	M3	1:0:1			C-299mm
Ma; Li; Wang (2018)	Dosagem		Ensaio realizado	Resultado	
	Traço	cimento : areia : rejeito de mineração : cinza volante : sílica ativa			
	R0	1 : 1,71 : 0 : 0,29 : 0,14			C-138mm
	R10	1 : 1,54 : 0,17 : 0,29 : 0,14			C-140mm
	R20	1 : 1,37 : 0,34 : 0,29 : 0,14			C-120mm
	R30	1 : 1,2 : 0,51 : 0,29 : 0,14			C-117mm
	R40	1 : 1,03 : 0,69 : 0,29 : 0,14			C-83mm
	R50	1 : 0,86 : 0,86 : 0,29 : 0,14			C-72mm
Drumond <i>et al.</i> (2023)	Dosagem		Ensaio realizado	Resultado	
	Traço	cimento : areia: <i>filler</i>			
	N	1:2,21			C-7 Camadas
	F	1:2,21:1,21			C-9 camadas
	C	1:1	C-9 camadas		
Legenda: *o autor realizou variação de aditivos, mantendo o mesmo traço. C – Ensaio de Construtibilidade. M – Ensaio mecânicos. P – Ensaio de Printabilidade. T– Ensaio de tempo de abertura.					

Fonte: o autor.

2.2 Materiais e métodos

O presente estudo possui dois objetivos principais: definir um traço ótimo avaliando cada proporção de sólidos dos traços da argamassa e otimizar a influência do uso de 3 aditivos através de um planejamento experimental de misturas em rede simplex. Na Figura 2.1 é possível observar a estruturação e metodologia utilizada neste trabalho.

Figura 2.1 - Fluxograma indicando a estrutura do artigo.



Fonte: o autor.

2.2.1 Materiais utilizados

Nesta pesquisa foram utilizados materiais que se encontram no estado sólido e no estado líquido, de forma que, no primeiro estado é possível citar o cimento, areia e o *filler* produzido a partir do resíduo de corte de rocha ornamental, enquanto os aditivos serão utilizados na forma líquida. Na Figura 2.2 é possível observar todos os materiais secos utilizados, o cimento(a); a areia (b) e o filler (c).

Figura 2.2 - Materiais utilizados na pesquisa.



Fonte: o autor.

2.2.1.1 Cimento

Foi utilizado o Cimento Portland da marca Cimento Campeão ECOMAX CP-III 32 RS, este possui massa específica de $2,92 \text{ g/cm}^3$, determinada através da ABNT NBR 1660:2017 e, área específica de $464,41 \text{ m}^2/\text{kg}$, determinada através da ABNT NBR 16372:2015. Este cimento

foi escolhido por possuir um baixo calor de hidratação e uma pega lenta, de forma a reduzir o aparecimento de fissuras por retração e maior tempo de trabalho da argamassa. Este tipo de cimento é um dos menos recomendado para a utilização em impressão 3D, uma vez que possui grandes grãos, dificultando a hidratação e possui pega lenta, tornando difícil o ganho de construtibilidade devido ao endurecimento precoce, tendo ciência de todos os pontos negativos deste tipo de cimento, ele foi utilizado para avaliar o comportamento da impressão em umas das situações menos favoráveis para a manufatura aditiva, de forma que a utilização de outros tipos de cimentos podem trazer ganhos ainda maiores para o método de construção.

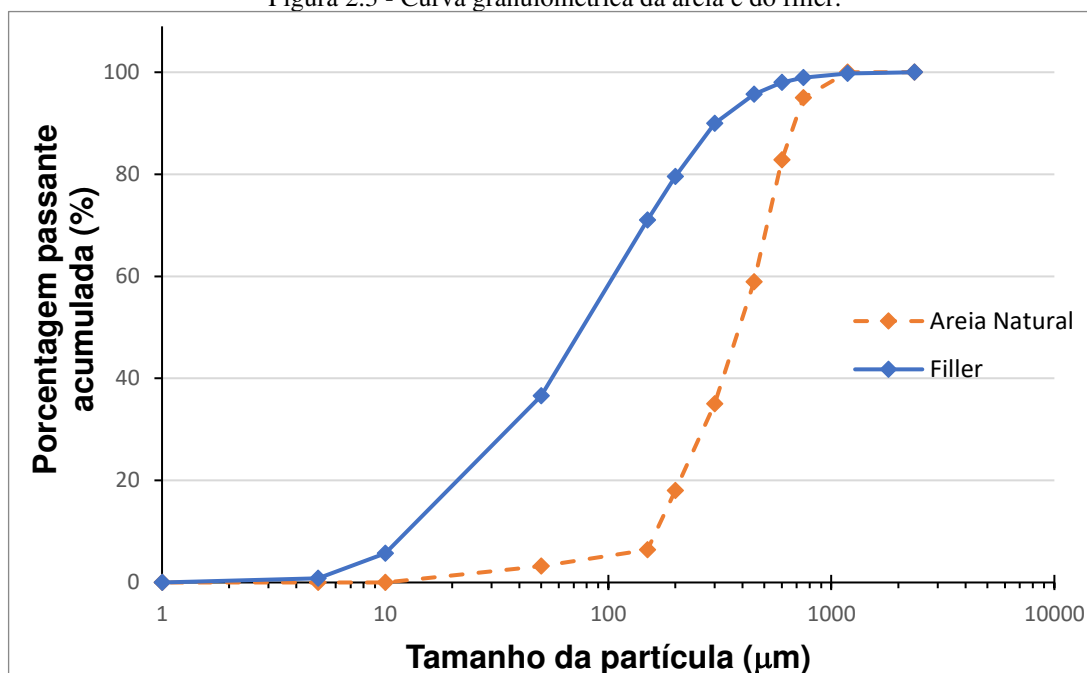
2.2.1.2 Agregado miúdo e filler

O agregado miúdo utilizado foi a areia natural de rio, peneirada na peneira número 16, com dimensão máxima do agregado de 1,18 mm. O agregado miúdo possui massa unitária média de $1,397\text{g/cm}^3$, definida através da ABNT NBR NM45:2021, granulometria e modulo de finura de 1,76, definido seguindo os parâmetros da ABNT NBR NM248:2003, na Figura 2.3, é mostrado a curva granulométrica da areia na cor laranja com o traço tracejado. O agregado miúdo apresenta também absorção de 0,91% e massa específica saturada superfície seca de $2,68\text{g/cm}^3$, de acordo com a ABNT NBR 16916:2021.

O Brasil é o quinto maior produtor mundial de rochas ornamentais. Para beneficiá-las, é necessário cortar as rochas brutas em placas, usando água para resfriar e lubrificar as lâminas. A água usada contém material particulado e precisa ser tratada para separar os resíduos sólidos, que são ambientalmente nocivos (Reis; Alvarez, 2007), podendo ser utilizado como material inerte em argamassas, preenchendo os vazios do material por ser um material extremamente fino (Dobiszewska *et al.*, 2023).

O *filler* utilizado foi o resíduo de rocha ornamental coletado em Cachoeiro do Itapemirim – ES. O material foi coletado em forma pastosa, ainda úmida, passando pelo processo de secagem ao ar, secagem em estufa e no final por destorroamento. Após o destorroamento, o material passou pelo moinho de bolas por 30 minutos para diminuir sua granulometria. Por fim, o material apresenta massa específica de $2,65\text{g/cm}^3$ ensaiado através da ABNT NBR 1660:2017, área específica de $744,79\text{ m}^2/\text{kg}$, determinada através da ABNT NBR 16372:2015 e curva granulométrica realizada pelo granulômetro a laser modelo *bettysize* 2000, conforme Figura 2.3 em faixa azul e contínua.

Figura 2.3 - Curva granulométrica da areia e do filler.



Fonte: O autor.

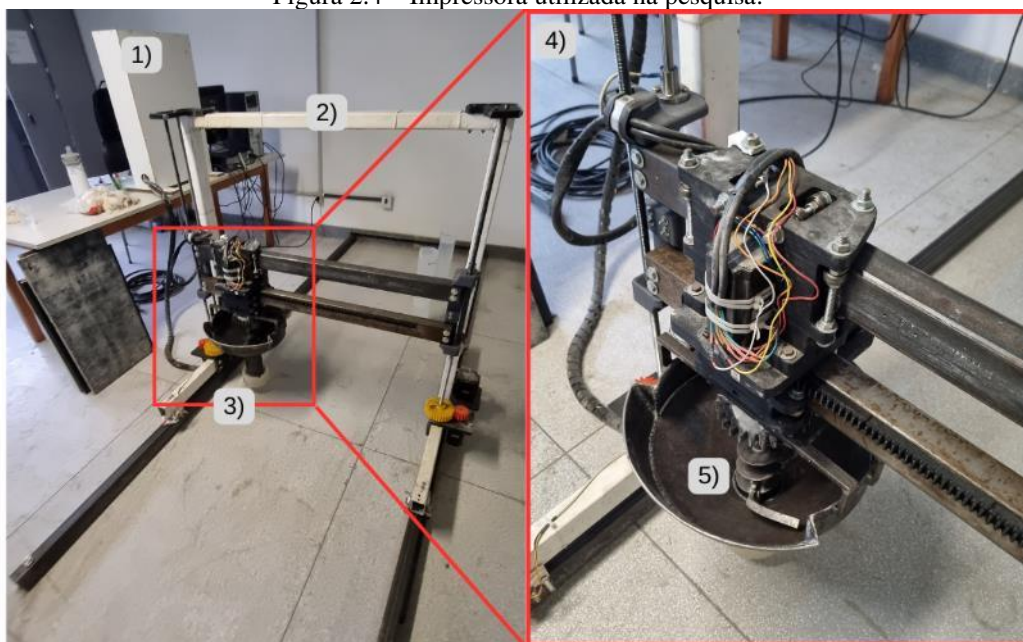
2.2.1.3 Aditivos

Para auxiliar na trabalhabilidade da argamassa foram utilizados três tipos de aditivos: modificador de viscosidade, incorporador de ar e retardador de pega. Para a primeira parte do trabalho foi utilizado o aditivo Modificador de consistência MC Bauchemie (*STABI 520*) na proporção de 0,5% da massa de cimento e o aditivo Incorporador de ar da GPC (*TEC MIX*) na proporção de 0,05% da massa de cimento. Na segunda etapa, para avaliação da influência dos aditivos, foram utilizados aditivos da mesma fabricante (MC Bauchemie): modificador de consistência (*STABI520*), incorporador de ar (*AIR200*) e o retardador de pega (*RETARD350*). Os aditivos foram utilizados respeitando a recomendação de utilização máxima indicada pelos fabricantes e, a alteração do aditivo incorporador de ar do primeiro para o segundo ensaio foi devido a disponibilidade do material no momento do ensaio.

2.2.1.4 Impressora 3D de argamassa

A Universidade Federal de Viçosa possui, no Departamento de Engenharia Civil, possui uma impressora 3D de argamassa do estilo pórtico deslizante, possuindo dimensões de impressão de 600 x 1300 x 600 mm. Na Figura 2.4 é possível observar detalhes da impressora 3D da UFV com os seus componentes: 1) Drivers de controle; 2) pórtico deslizante; 3) bico com abertura de 25 mm; 4) conjunto extrusor e 5) funil de extrusão.

Figura 2.4 – Impressora utilizada na pesquisa.



Fonte: O autor.

2.2.2 Estudo dos materiais sólidos na printabilidade e construtibilidade

A definição de traço ótimo se deu como ponto de partida o traço utilizado na pesquisa anterior de Drumond *et al.* (2023), no qual foi nomeado de T0. Esse estudo encontrou relações preliminares entre os materiais da argamassa, de forma que: para cada parte de cimento, há uma relação de 1:1,2 de filler. De mesma maneira, a areia possui relação de 1:1 com os finos (cimento e filler) e a água possui proporção de 0,44 da massa dos finos. Partindo desse traço T0, foram realizadas variações a fim de se observar a influência no comportamento de construtibilidade e printabilidade de cada material, alterando as relações com valores abaixo e acima do traço de referencia (T0). Para isso, foi seguida a seguinte nomenclatura: TFx (x é quantidade unitária utilizada do material) para os traços em que haja a variação da relação *filler* - cimento, TSx (x é quantidade unitária utilizada do material) para os traços em que haja a variação da proporção areia - finos e TWx (x é quantidade unitária utilizada do material) para os traços em que haja a variação da relação água – finos. Na Tabela 2.2 é possível observar os traços unitários de cada uma das variações supracitadas. Para todos os traços foram utilizadas as mesmas quantidades de aditivos modificadores de consistência na proporção de 0,5% da massa de cimento e aditivo incorporador de ar na proporção de 0,05% da massa de cimento.

Tabela 2.2 - Traços unitários utilizados na definição da argamassa utilizada.

Nomenclatura	Cimento (kg)	Filler (kg)	Areia (kg)	Água (kg)
T0	1,000	1,200	2,200	0,968
TF0800	1,000	0,800	1,800	0,792
TF1000	1,000	1,000	2,000	0,880
TF1400	1,000	1,400	2,400	1,056
TS1320	1,000	1,200	1,320	0,968
TS1760	1,000	1,200	1,760	0,968
TS2640	1,000	1,200	2,640	0,968
TW0924	1,000	1,200	2,200	0,924
TW0990	1,000	1,200	2,200	0,990
TW1912	1,000	1,200	2,200	1,012

Fonte: O autor.

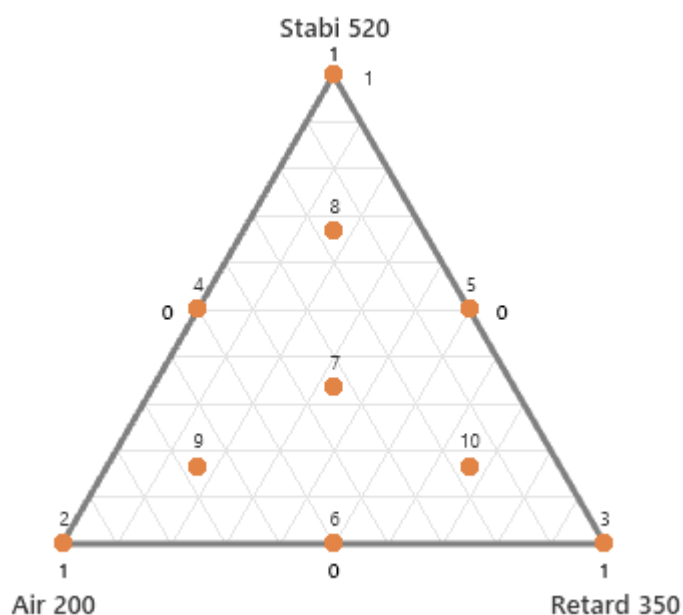
2.2.3 Estudo dos aditivos na printabilidade e construtibilidade

No estudo de determinação da quantidade ótima de aditivo foi adotado como traço-base o traço definido como melhor printabilidade desde que não tivesse uma construtibilidade abaixo de 10 camadas. O traço que mais se adequou foi o traço TS1760, que apresentou 10 camadas de construtibilidade e obteve a melhor printabilidade entre os demais.

Diferentemente do teste anterior para determinação da proporção ótima de matérias sólidas, no estudo dos aditivos buscou-se a observar a variação de 0 a 100% do valor máximo indicado pelo fabricante de cada um dos aditivos, permitindo o uso o método estatístico de planejamento experimental de misturas em rede simplex, desenvolvido nos anos 50 por Henry Scheffé (Scheffé, 1958). A utilização deste método é baseada nas proporções de cada um dos componentes estudados, de forma que a soma de todos os componentes para cada traço deva ser igual. O estudo pode ser feito utilizando todos os vértices do triângulo de misturas como feito por (Diniz, 2023) (todas as proporções de todos os aditivos atingem 100% de uso e analisa as suas influências separadamente) ou apenas uma parte, permitindo um estudo focalizado em uma região específica, como proposto por Mendes (2019).

O planejamento de mistura utilizado foi o de simplex centróide com o triângulo completo com adição de pontos intermediários, de forma a que todos os aditivos atinjam 100% do uso recomendado pelo fabricante. Na Figura 2.5 é demonstrado um gráfico com as proporções utilizadas para cada um dos pontos. De forma mais precisa e clara, na Tabela 2.3 são demonstradas as porcentagens exatas de cada um dos aditivos para cada traço, de forma que a nomenclatura de cada traço é dada por TS1760-X-Y-Z, em que X é a porcentagem da massa de cimento utilizada do aditivo Stabi520, Y é a porcentagem da massa de cimento utilizada do Aditivo Air200 e Z é a porcentagem da massa de cimento utilizada do aditivo Retard350.

Figura 2.5 - Pontos do simplex centroide utilizado no estudo de aditivos.



Fonte: O autor.

Tabela 2.3 - Porcentagens de cada aditivo em cada traço, no gráfico *simplex* e em relação ao máximo recomendado pelo fabricante.

	Aditivos na rede <i>simplex</i>			aditivos em relação à percentagem máxima recomendada pelo fabricante		
	<i>Stabi 520</i>	<i>Air 200</i>	<i>Retard 350</i>	<i>Stabi 520</i> (%)	<i>Air 200</i> (%)	<i>Retard 350</i> (%)
TS1760-1,5-0-0	1,00	0,00	0,00	1,50%	0,00%	0,00%
TS1760-0-0,5-0	0,00	1,00	0,00	0,00%	0,50%	0,00%
TS1760-0-0-1,5	0,00	0,00	1,00	0,00%	0,00%	1,50%
TS1760-0,75-0,25-0	0,50	0,50	0,00	0,75%	0,25%	0,00%
TS1760-0,75-0-0,75	0,50	0,00	0,50	0,75%	0,00%	0,75%
TS1760-0-0,25-0,75	0,00	0,50	0,50	0,00%	0,25%	0,75%
TS1760-0,5-0,17-0,5	0,33	0,33	0,33	0,50%	0,17%	0,50%
TS1760-1-0,08-0,25	0,67	0,17	0,17	1,00%	0,08%	0,25%
TS1760-0,25-0,33-0,25	0,17	0,67	0,17	0,25%	0,33%	0,25%
TS1760-0,25-0,08-1	0,17	0,17	0,67	0,25%	0,08%	1,00%

Fonte: O autor.

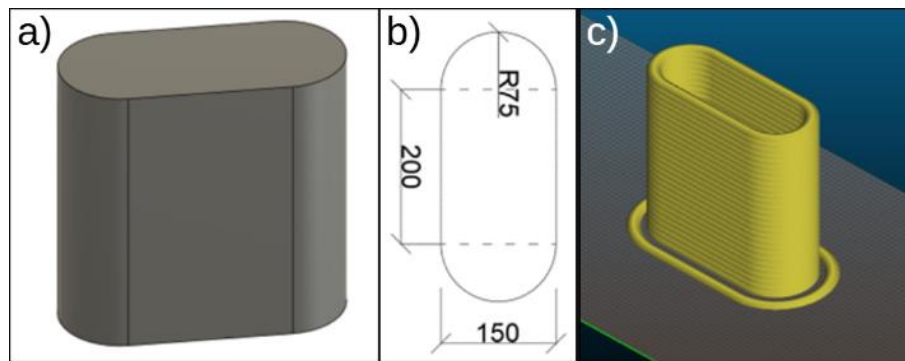
2.2.4 Definição do traço ótimo

O traço ótimo foi definido através de regressão linear da influência de cada um dos aditivos na construtibilidade e na printabilidade dos corpos de prova de argamassa, de forma que, ao configurar no *software Minitab 21*, foi solicitado o valor de printabilidade máximo (nota 10) e para construtibilidade um valor maior do que o número de camadas alcançado.

2.2.5 Avaliação da construtibilidade

A construtibilidade foi avaliada através de corpos de prova que possuíam trechos lineares (de 200 mm) e semicírculos (de 150 mm de diâmetro), foram configurados com altura de camada de 12,5 mm e largura do cordão de 25 mm estabelecido pelo diâmetro do bico. Para haver um movimento contínuo e ininterrupto o arquivo *.gcode* foi configurado como modo de impressão tipo vaso, fazendo com que o cordão do corpo de prova fosse impresso através de uma espiral ascendente ininterrupta. A altura do objeto foi configurada grande o suficiente para que houvesse a falha no corpo de prova durante o momento da impressão, possibilitando caracterizar a construtibilidade. Na Figura 2.6 o arquivo do objeto sólido criado (a); suas dimensões em milímetros (b) e o objeto no *software* fatiador *Slic3r* (c).

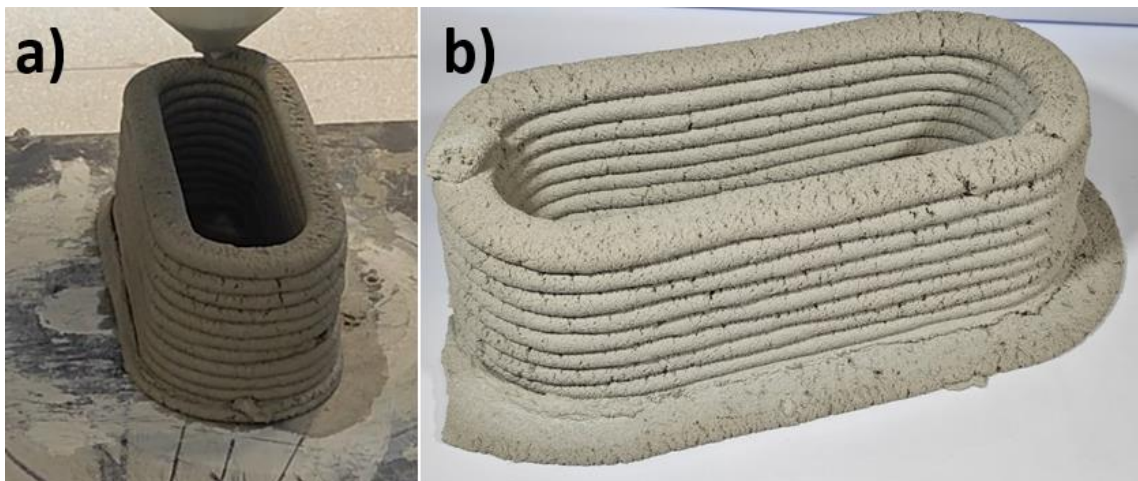
Figura 2.6 - Corpo de prova utilizado nos ensaios e suas dimensões em milímetros.



Fonte: O autor.

Na Figura 2.7-a apresenta-se o corpo de prova impresso do traço T0 no momento da impressão (instantes antes de colapsar) e na Figura 2.7-b o objeto está solidarizado e endurecido, possibilitando avaliar a printabilidade e falhas na impressão.

Figura 2.7 - Corpo de prova T0 impresso.



Fonte: O autor.

2.2.6 Avaliação da printabilidade

A printabilidade é um parâmetro de impressão qualitativo e, para se ter uma maior precisão e rigor nas notas dadas, foram definidas categorias de avaliação para padronizar as notas de cada traço.

Foi definido 4 sub parâmetros de avaliação para printabilidade, de maneira que cada um deles possuísse nota entre 0 a 2,5 e, ao final, a soma dos 4 pudesse atingir nota 10. Os critérios de avaliação escolhidos foram: Homogeneidade; Rugosidade; Abatimento e Precisão de forma. A junção destes quatro parâmetros foi nomeada de HRAP.

A homogeneidade foi considerada como sendo a variação do acabamento superficial do corpo de prova impresso. A rugosidade foi avaliada com base na quantidade de poros, orifícios e irregularidades presentes na superfície dos cordões. O abatimento foi considerado o achatamento da camada de base ao ser empilhado as camadas subsequentes. Por fim, a precisão de forma foi considerada como a porcentagem em que o último cordão impresso (cordão de topo) corresponde à largura prevista para a impressão (largura do bico).

2.2.7 Reologia

Para o estudo reológico foi utilizado o reômetro *Anton Paar* modelo MCR 72 com a ferramenta de palheta de Vane, com quatro lâminas, modelo ST22-4V-40, possuindo 22 mm de largura e 40 mm de altura a $22 \pm 1^\circ\text{C}$. Os ensaios foram realizados utilizando sempre a mesma massa (170 g) de modo que as palhetas fiquem completamente submersas na argamassa, como demonstrado na Figura 2.8.

Figura 2.8 – Experimento montado no *Anton Paar* MCR72.



Fonte: O autor.

Para garantir uma homogeneidade dos ensaios e a energia de amassamento, os traços utilizados foram calculados para 0,2 kg de cimento. Na Tabela 2.4 e Tabela 2.5 estão identificadas as quantidades de materiais preparados para os ensaios de reologia, sendo a primeira tabela referente ao estudo do traço seco e a segunda referente ao estudo do aditivo.

Cada traço utilizado o procedimento e tempo de mistura conforme a ABNT NBR 16541 (ABNT, 2016), e os recipientes foram preenchidos seguindo sempre a mesma sequência de compactação: preenchendo aproximadamente metade do volume, seguido de dez quedas do recipiente de aproximadamente 1 centímetro, posteriormente preenchendo o restante até completar a massa estabelecida (170 g) e por fim realizando 10 quedas da mesma altura para completar o processo de compactação e adensamento no recipiente. O início do ensaio foi dado em todas as amostras com 10 minutos de hidratação.

Tabela 2.4 - Massas utilizadas para os ensaios reológicos do estudo de traço.

	Cimento (kg)	Filler (kg)	Areia (kg)	Água (kg)	Stabi520 (g)	Tec mix (g)	Retard 350 (g)
T0	0,200	0,240	0,440	0,194	1,000	0,100	0,000
TF0800	0,200	0,160	0,360	0,158	1,000	0,100	0,000
TF1000	0,200	0,200	0,400	0,176	1,000	0,100	0,000
TF1400	0,200	0,280	0,480	0,211	1,000	0,100	0,000
TS1320	0,200	0,240	0,528	0,194	1,000	0,100	0,000
TS1760	0,200	0,240	0,352	0,194	1,000	0,100	0,000
TS2640	0,200	0,240	0,264	0,194	1,000	0,100	0,000
TW0924	0,200	0,240	0,440	0,185	1,000	0,100	0,000
TW0990	0,200	0,240	0,440	0,198	1,000	0,100	0,000
TW1912	0,200	0,240	0,440	0,202	1,000	0,100	0,000

Fonte: O autor.

Tabela 2.5 - Massas utilizadas para os ensaios reológicos do estudo de aditivos.

	Cimento (kg)	Filler (kg)	Areia (kg)	Água (kg)	Stabi520 (g)	Air200 (g)	Retard 350 (g)
TS1760-1,5-0-0	0,200	0,240	0,352	0,194	3,000	0,000	0,000
TS1760-0-0,5-0	0,200	0,240	0,352	0,194	0,000	1,000	0,000
TS1760-0-0-1,5	0,200	0,240	0,352	0,194	0,000	0,000	3,000
TS1760-0,75-0,25-0	0,200	0,240	0,352	0,194	1,500	0,500	0,000
TS1760-0,75-0-0,75	0,200	0,240	0,352	0,194	1,500	0,000	1,500
TS1760-0-0,25-0,75	0,200	0,240	0,352	0,194	0,000	0,500	1,500
TS1760-0,5-0,17-0,5	0,200	0,240	0,352	0,194	1,000	0,333	1,000
TS1760-1-0,08-0,25	0,200	0,240	0,352	0,194	2,000	0,167	0,500
TS1760-0,25-0,33-0,25	0,200	0,240	0,352	0,194	0,500	0,667	0,500
TS1760-0,25-0,08-1	0,200	0,240	0,352	0,194	0,500	0,167	2,000
T _{totm}	0,200	0,240	0,352	0,194	1,333	0,556	0,000

Fonte: O autor.

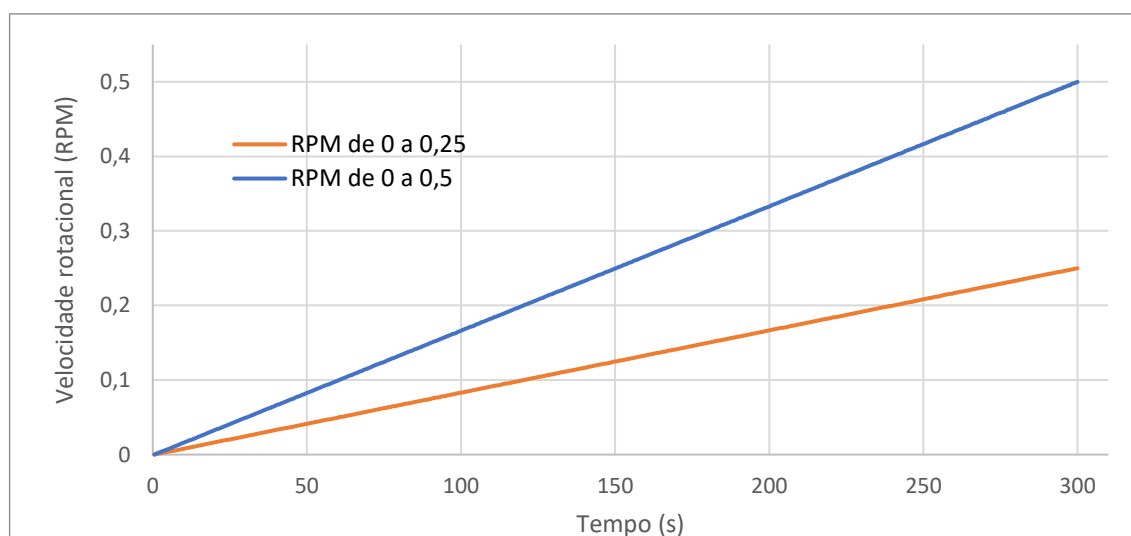
Decidiu-se trabalhar com dados brutos, utilizando duas amostras com duas rampas lineares: de 0 a 0,25 e de 0 a 0,50, ambas com inclinação positiva até atingirem 5 minutos (300

segundos), e extraindo os dados de tensão de cisalhamento máxima e torque máximo em que a argamassa atingia antes de apresentar ruptura.

Na Figura 2.9 estão demonstradas as duas curvas que expressam a evolução da velocidade rotacional (RPM) no tempo para os dois protocolos seguidos.

Para os mesmos traços, foram obtidos os Índices de Consistência da argamassa, seguindo os critérios estabelecidos pela ABNT NBR 13276 (2016).

Figura 2.9 – Evolução da velocidade rotacional no tempo dos dois protocolos seguidos.



Fonte: O autor.

2.3 Resultados

Nesta seção serão apresentados os resultados do estudo da influência de cada elemento do traço e dos aditivos, bem como a definição do traço ótimo. Serão apresentados também os resultados obtidos através do estudo reológico, comparando a tensão de cisalhamento máxima de cada traço.

2.3.1 Influência de cada material seco do traço

Os resultados dos parâmetros individuais do HRAP estão dados na Tabela 2.6, os dados de construtibilidade e printabilidade para a avaliação da influência dos materiais secos podem ser notados na Tabela 2.7. Dentre os resultados, observa-se os traços TS1320 e TW0924, que possuem parâmetros nulos de construtibilidade e printabilidade, pois eles apresentaram alta consistência, impedindo o material de ser extrudado pela impressora. De forma contrária, destaca-se também os traços TS2640 e TW1912, que apresentaram grande fluidez e, apesar de

apresentar uma nota elevada de printabilidade, apresentaram um número baixo de camadas que foram empilhadas.

Tabela 2.6 - Resultados dos parâmetros HRAP para avaliação da printabilidade dos corpos de prova.

Traço	Largura média do filete de topo (seco) em mm		Parâmetros individuais HRAP				HRAP
			Homog.	Rugosidade	Abatimento	Prec. de forma	
	Média	Desvio Padrão					
T0	29,01	0,422	1,8	1,5	2,0	2,2	7,5
TF0800	28,79	0,675	2,0	1,8	1,9	2,2	7,9
TF1000	26,09	0,343	1,5	1,0	1,8	2,4	6,7
TF1400	28,41	1,386	1,8	0,9	1,0	2,2	5,9
TS1320	33,85	0,606	2,2	2,5	1,5	1,8	8,0
TS1760	32,86	0,250	2,5	2,3	2,0	1,9	8,7
TS2640	0,00	0,000	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
TW0924	0,00	0,000	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
TW0990	30,58	0,564	1,9	1,7	1,9	2,0	7,5
TW1912	32,13	0,571	2,4	2,2	1,7	1,9	8,2

Fonte: O autor.

Tabela 2.7 - Resultados de construtibilidade e printabilidade para a avaliação dos materiais.

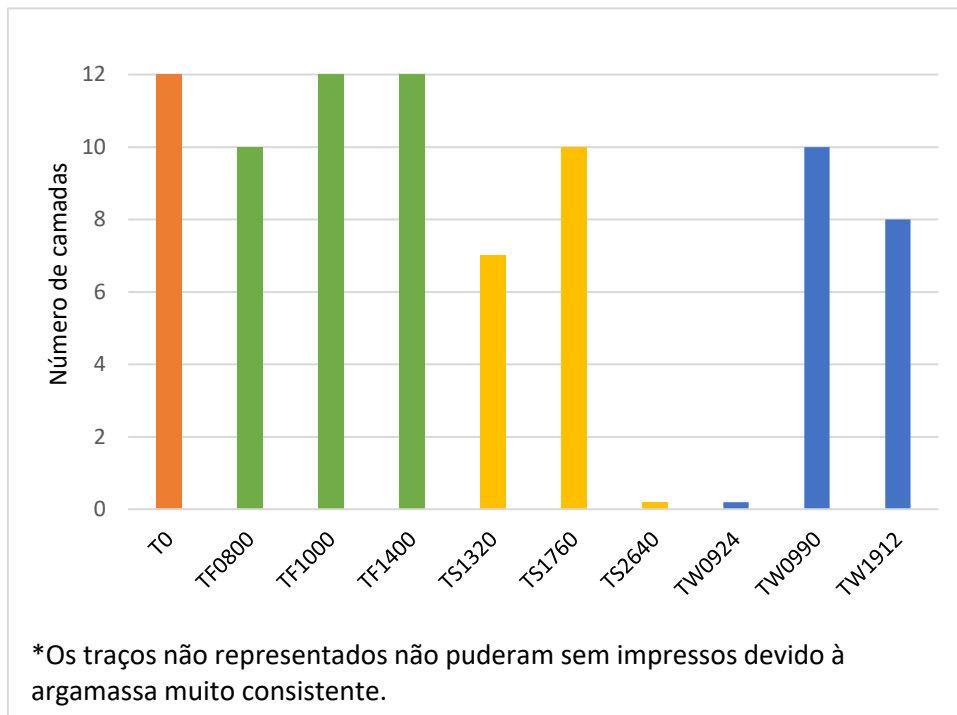
Nomenclatura	Construtibilidade (nº de camadas)	Printabilidade (HRAP)	Índice de Consistência (cm)
T0	12	6	317,9
TF0800	10	7,5	322,1
TF1000	12	6,5	321,9
TF1400	12	5	317,7
TS1320	-	-	299,3
TS1760	10	10	335,9
TS2640	7	9,5	367,3
TW0924	-	-	297,3
TW0990	10	9	333,2
TW1912	8	8,5	341,0

Fonte: O autor.

Através dos dados obtidos de construtibilidade e printabilidade, foi possível plotar gráficos para cada sub conjunto de traço (TFX, TSX e TWX), avaliando a influência da variação dos materiais secos no comportamento da argamassa e comparando com o traço original T0. Na Figura 2.8 é possível notar a influência de cada um dos materiais na construtibilidade de forma que, em laranja, está o traço inicial, em verde o traço em que houve a variação do filler, em amarelo a variação da areia e em azul a variação da relação água/finos, de forma que, após a nomenclatura, entre parênteses, está a relação utilizada dos materiais. Já na Figura 2.9 está representado a influência de cada material na Printabilidade do corpo de prova, seguindo a mesma lógica da figura anterior.

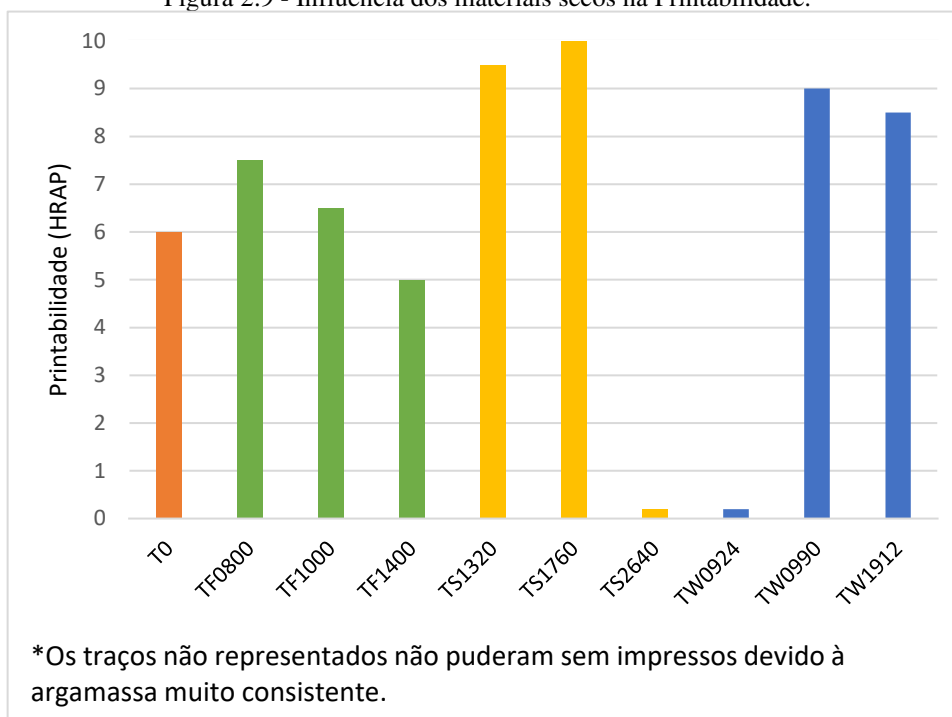
De acordo com o demonstrado na Figura 2.7, é possível perceber que quanto maior a quantidade de água, mais fluida é a argamassa e por consequência menos camadas é possível empilhar. De forma contrária, os traços com maiores concentrações de areia apresentaram uma melhora da construtibilidade, apresentando um limite superior de consistência que foi ultrapassado, impedindo a impressão do traço TS2640. Já o filler não apresentou alteração significativa neste parâmetro à medida que se aumentava a sua concentração.

Figura 2.8 - Influência dos materiais secos na Construtibilidade.



Fonte: O autor.

Figura 2.9 - Influência dos materiais secos na Printabilidade.



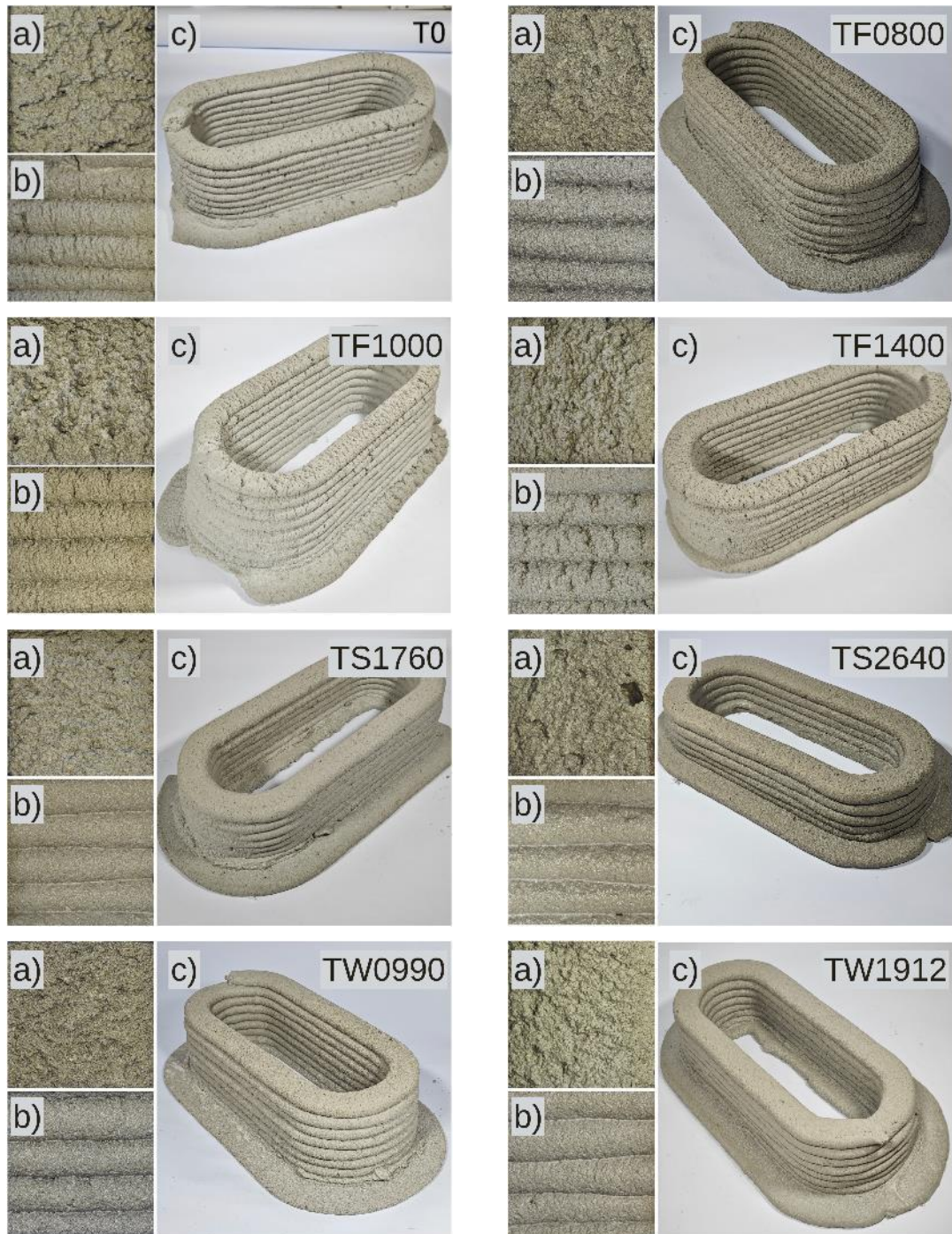
Fonte: O autor.

Nos traços que apresentaram maior variação da Construtibilidade apresentaram também uma melhoria da Printabilidade, de forma que, inicialmente, dar-se-á entender que há um ponto ótimo de fluidez para o melhor acabamento superficial, porém, ao analisar o gráfico da influência do *filler*, quanto menor a quantidade do material fino, melhor o acabamento superficial do cordão e menor a rugosidade.

Na Figura 2.10 é possível observar detalhes dos traços impressos. Nota-se o detalhe da camada superficial, com seus relevos no acabamento da superfície no último cordão impresso (a); o acabamento e detalhe dos empilhamentos dos cordões (b); e o acabamento de cada corpo de prova (c). No Apêndice A é possível observar as figuras em maiores dimensões, apresentando mais detalhes dos corpos de prova e acabamento superficial.

Os traços TS1320 e TW0924 ficaram muito consistentes, impossibilitando a impressão e resultados de construtibilidade e printabilidade. O traço considerado como melhor desempenho de printabilidade foi o TS1760, sendo esse o traço escolhido para seguir na avaliação da influência do uso de aditivos.

Figura 2.10 – Corpos de prova do estudo do traço seco com detalhe das camadas laterais e do filete de topo.



Fonte: O autor.

2.3.2 Influência de cada aditivo

Os resultados individuais dos parâmetros HRAP estão descritos na Tabela 2.10 enquanto os resultados de construtibilidade e printabilidade para a avaliação da influência dos aditivos podem ser observados na

Tabela 2.11. Os traços TS1760-0-0-1,5 e TS1760-0,25-0,08-1 apresentaram o pior desempenho no que se trata da printabilidade, pois são os dois traços que apresentam grande

fluidez e grande espalhamento no Índice de Consistência, devido à alta concentração do aditivo retardador de pega, que acabou gerando um efeito plastificante no material.

Tabela 2.10 - Resultados dos parâmetros HRAP para avaliação da printabilidade dos corpos de prova.

Traço	Largura média do filete de topo (seco) em mm		Parâmetros individuais HRAP				HRAP
	Média	Desvio Padrão	Homog.	Rugosidade	Abatimento	Prec. de forma	
TS1760-1,5-0-0	33,2	0,594	1,9	1,9	2,1	1,9	7,7
TS1760-0-0,5-0	26,0	0,276	2,5	0,0	1,8	2,4	6,6
TS1760-0-0-1,5	36,8	1,252	1,0	1,0	0,3	1,7	3,9
TS1760-0,75-0,25-0	34,0	0,250	2,1	2,1	2,4	1,8	8,3
TS1760-0,75-0-0,75	31,2	0,322	1,0	1,4	0,4	2,0	4,8
TS1760-0-0,25-0,75	30,7	1,557	1,7	1,4	0,5	2,0	5,6
TS1760-0,5-0,17-0,5	34,9	0,490	2,1	1,9	2,1	1,8	7,9
TS1760-1-0,08-0,25	35,0	0,559	2,1	2,2	2,0	1,8	8,0
TS1760-0,25-0,33-0,25	35,5	0,832	2,0	2,1	2,1	1,8	7,9
TS1760-0,25-0,08-1	34,6	1,700	1,5	1,7	1,3	1,8	6,2

Fonte: O autor.

Tabela 2.11 - Resultados de construtibilidade e printabilidade para a avaliação dos aditivos.

Nomenclatura	Construtibilidade (nº de camadas)	Printabilidade (HRAP)	Índice de Consistência (cm)
TS1760-1,5-0-0	8	8,2	345,7
TS1760-0-0,5-0	9	6,7	338,5
TS1760-0-0-1,5	5	4,4	374,2
TS1760-0,75-0,25-0	8	8,8	354,7
TS1760-0,75-0-0,75	6	4,8	361,0
TS1760-0-0,25-0,75	7	5,7	356,3
TS1760-0,5-0,17-0,5	8	8,4	336,4
TS1760-1-0,08-0,25	7	8,5	346,3
TS1760-0,25-0,33-0,25	7	8,4	339,9
TS1760-0,25-0,08-1	5	6,6	349,3

Fonte: O autor.

Na Figura 2.11, detalhes dos traços impressos, considerando a influência dos aditivos. Nota-se o detalhe da camada superficial, com seus relevos bem como o acabamento da superfície no último cordão impresso (a); o acabamento e detalhe dos empilhamentos dos cordões (b); acabamento de cada corpo de prova (c). No Apêndice A é possível observar as figuras em maiores dimensões, apresentando mais detalhes dos corpos de prova e acabamento superficial.

Figura 2.11 – Corpos de prova do estudo de aditivos com detalhe das camadas laterais e do filete de topo.



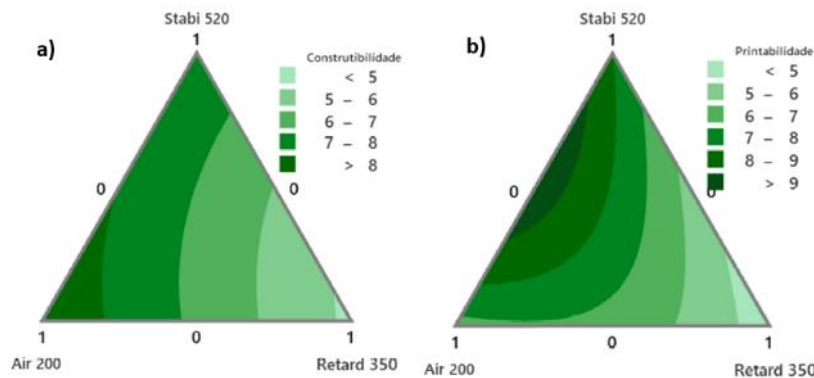
Fonte: O autor.

Alguns corpos de prova apresentaram fissuras devido à retração, como é possível notar nos traços TS1760-0-0-1,5 e TS1760-0,25-0,08-1, indicados pela seta em vermelho.

Ao gerar o gráfico de influência dos aditivos para a construtibilidade (Figura 2.12–a) e printabilidade (Figura 2.12–b), por meio do *software Minitab 21*, foi possível notar a influência de cada um dos aditivos no comportamento da argamassa, nas duas características analisadas, a presença do retardador de pega tornou a argamassa menos empilhável e muito fluida, atrapalhando também a printabilidade. Na construtibilidade, o aditivo incorporador de ar apresentou uma melhora sutil em relação ao estabilizador de consistência, enquanto na printabilidade a região ótima foi obtida no centro da aresta que continha somente estes mesmos dois aditivos.

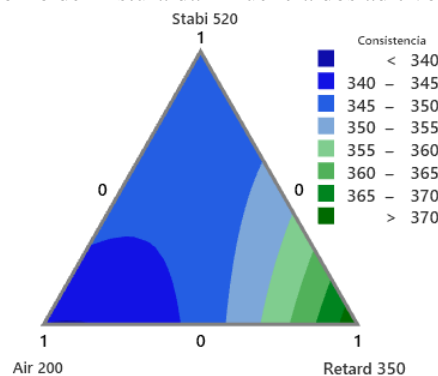
Para fins de análise, obteve-se também a influência de cada um dos aditivos na consistência da argamassa, através dos resultados de índice de consistência encontrados anteriormente. Na Figura 2.13, o aditivo retardador de pega influenciou diretamente na consistência da argamassa, tornando-a mais fluida.

Figura 2.12 – Gráficos de contorno de mistura da influência dos aditivos na a) construtibilidade e b) printabilidade.



Fonte: O autor.

Figura 2.13 – Gráficos de contorno de mistura da influência dos aditivos na consistência da argamassa.3



Fonte: O autor.

2.3.3 Definição do traço ótimo

Após a análise no *software Minitab 21* das influências de cada um dos aditivos na printabilidade e construtibilidade, foi gerado a otimização da resposta e inserido no programa o valor alvo em que se quer atingir para a printabilidade e a construtibilidade, bem como a importância de cada um desses parâmetros através de um peso que pode ser fornecido. Desta forma, como os corpos de prova TS1760-X não apresentaram construtibilidade maior que 10, foi solicitado ao *Minitab 21* para tentar atingir este valor, bem como a nota 10 na Printabilidade. Diante da iteração, o programa estatístico retornou as porcentagens de uso de cada um dos aditivos, sendo 44% para o *Stabi520* e 56% para o *Air200*, porém assim como na etapa anterior, as porcentagens devem ser multiplicadas pelo uso máximo recomendado pelo fabricante, ficando assim estabelecido a utilização de 0,67% para o *Stabi520* e 0,28% para o *Air200*, sendo estes últimos valores, em relação à massa de cimento. Ainda através da análise estatística, o programa previu uma construtibilidade de 8 camadas e uma printabilidade de 9,49. Na Figura 2.14 é possível observar o corpo de prova de produzido conforme os parâmetros ótimos indicados pela análise, de forma que, para demonstrar o acabamento superficial foi necessário interromper a impressão com 2 camadas a menos do que o limite atingido. Assim, após a impressão do traço ótimo, o corpo de prova atingiu 8 camadas de construtibilidade e nota 9,14 de printabilidade.

Figura 2.14 – Corpo de prova T_{OTM} , com detalhes do cordão superior e da lateral das camadas.



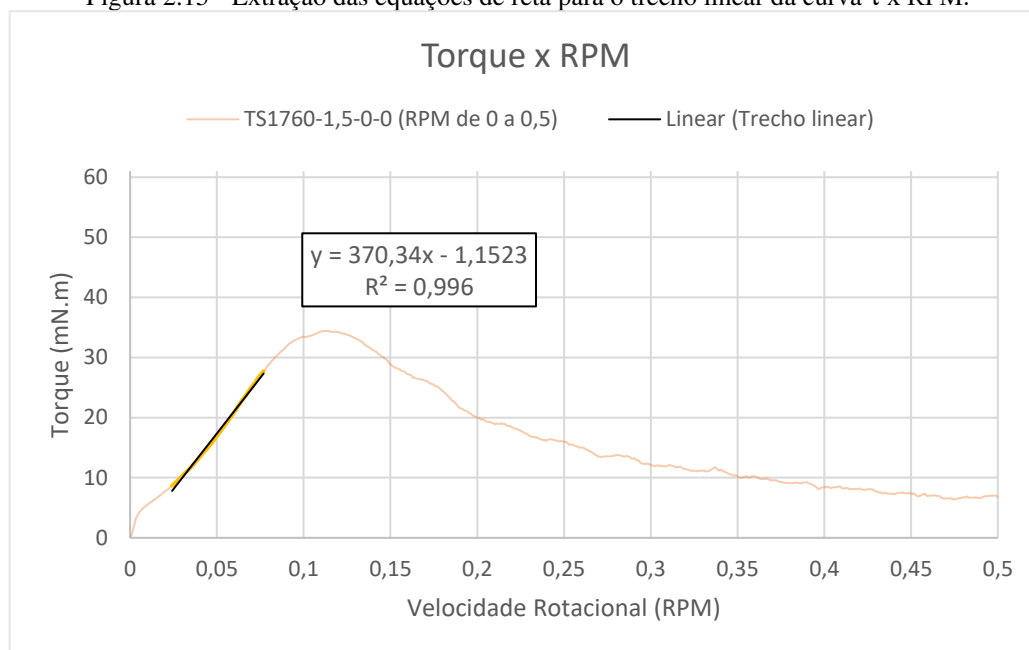
Fonte: O autor.

2.3.4 Reologia

Após o uso do reômetro rotativo foi extraído uma curva de tensão de cisalhamento (Pa) x velocidade rotacional (RPM) ao longo do ensaio, de forma que a maioria das curvas analisadas seguem um comportamento similar ao da curva em laranja demonstrada na Figura 2.15. Desta forma, observou-se que as curvas apresentavam um trecho linear no trecho depois de certa

velocidade rotacional e antes do pico, de forma que, ao analisar o trecho entre $0,25 \tau_{\max}$ e $0,75 \tau_{\max}$ era possível extrair uma equação de reta com um R^2 superior a 0,98 em quase totalidade dos casos, como demonstrado na Figura 2.15. Desta forma, na Tabela 2.12 está descrito um resumo dos resultados obtidos e as equações de reta para cada um dos traços em que foi realizado o ensaio de reologia, de forma que a velocidade rotacional varia de 0 a 0,25 e, na Tabela 2.13, para a velocidade rotacional variando de 0 a 0,5 RPM .

Figura 2.15 - Extração das equações de reta para o trecho linear da curva τ x RPM.



Fonte: O autor.

Nos gráficos da Figura 2.15 é possível realizar a associação com os diagramas de cisalhamento direto de solos, que apresentam um trecho linear e, seguido de um pico e por fim uma tensão residual da estrutura do material já rompida, restando apenas a resistência causada pelo atrito dinâmico. Ao analisar os dados foi possível notar uma correlação do torque e da tensão de cisalhamento com alguns parâmetros de impressão, de forma que as correlações feitas com os dois parâmetros acima apresentavam a mesma correlação estatística, apresentando o mesmo R^2 . Desta maneira, é possível associar a tensão de cisalhamento e a inclinação das curvas tensão por rotação com a construtibilidade e o Índice de Consistência. Na Figura 2.16 é possível observar os gráficos que correlacionam estes parâmetros da reologia rotacional com parâmetros dos corpos de prova impressos. Em todos os gráficos, os pontos em cor laranja representam as velocidades rotacionais variando de 0 a 0,25 e em azul variando de 0 a 0,5.

Tabela 2.12 - Reologia seguindo o protocolo de 0 a 0,25 em 300 segundos.

Traço	Tem. Cis. Máx. (Pa)	Torque Máx. (mN*m)	Vel. Rota.do pico (RPM)	Equação do trecho linear e R ² do torque		Equação do trecho linear e R ² da Tensão de Cisalhamento	
				Equação	R ²	Equação	R ²
T0	3156,4	33,632	0,076022	560,24x - 2,4835	0,9938	52579x - 233,08	0,9938
TF0800	2379,5	25,354	0,081779	415,01x - 2,1252	0,9951	38949x - 199,44	0,9951
TF1000	2988,5	31,844	0,079194	591,17x - 2,1736	0,9936	55481x - 203,99	0,9936
TF1400	3206,3	34,164	0,08343	581,54x - 2,2212	0,9897	54578x - 208,48	0,9897
TS1320	4759	50,709	0,064989	994,36x - 7,0621	0,9931	93321x - 662,79	0,9931
TS1760	2060,8	21,958	0,083553	351,67x - 0,7888	0,9957	33004x - 74,012	0,9957
TS2640	1756,9	18,721	0,07096	313,02x - 1,041	0,9979	29377x - 97,7	0,9979
TW0924	4501,5	47,965	0,071054	930,95x - 6,6303	0,991	87370x - 622,25	0,991
TW0990	2499	26,628	0,088553	469,72x - 2,6202	0,9962	44083x - 245,91	0,9962
TW1912	2180,3	23,232	0,094347	396,02x - 1,8901	0,9944	37167x - 177,39	0,9944
TS1760-1,5-0-0	2766,8	29,481	0,068822	487,6x - 1,4355	0,9959	45761x - 134,72	0,9959
TS1760-0-0,5-0	1988,6	21,189	0,069296	346,28x + 1,0003	0,998	32499x + 93,88	0,998
TS1760-0-0-1,5	1102,8	11,751	0,11698	34,631x + 4,9235	0,3057	3250,1x + 462,07	0,3057
TS1760-0,75-0,25-0	2116	22,547	0,081911	317,91x + 0,7983	0,9962	29836x + 74,92	0,9962
TS1760-0,75-0-0,75	1234,6	13,155	0,096411	198,28x - 1,3491	0,9984	18609x - 126,62	0,9984
TS1760-0-0,25-0,75	2184,7	23,278	0,063904	422,53x + 0,6583	0,9979	39654x + 61,799	0,9979
TS1760-0,5-0,17-0,5	1760,8	18,762	0,089212	293,9x - 0,1133	0,9976	27583x - 10,634	0,9976
TS1760-1-0,08-0,25	1543,5	16,446	0,091829	213,6x + 0,2202	0,9933	20047x + 20,66	0,9933
TS1760-0,25-0,33-0,25	1769,7	18,856	0,075165	304,55x - 0,7794	0,9976	28582x - 73,152	0,9976
TS1760-0,25-0,08-1	1090	11,614	0,08716	146,99x - 0,8423	0,9954	13795x - 79,048	0,9954
T _{otm}	2294,3	24,446	0,081784	382,14x - 0,7211	0,998	35864x - 67,686	0,998

Fonte: O autor.

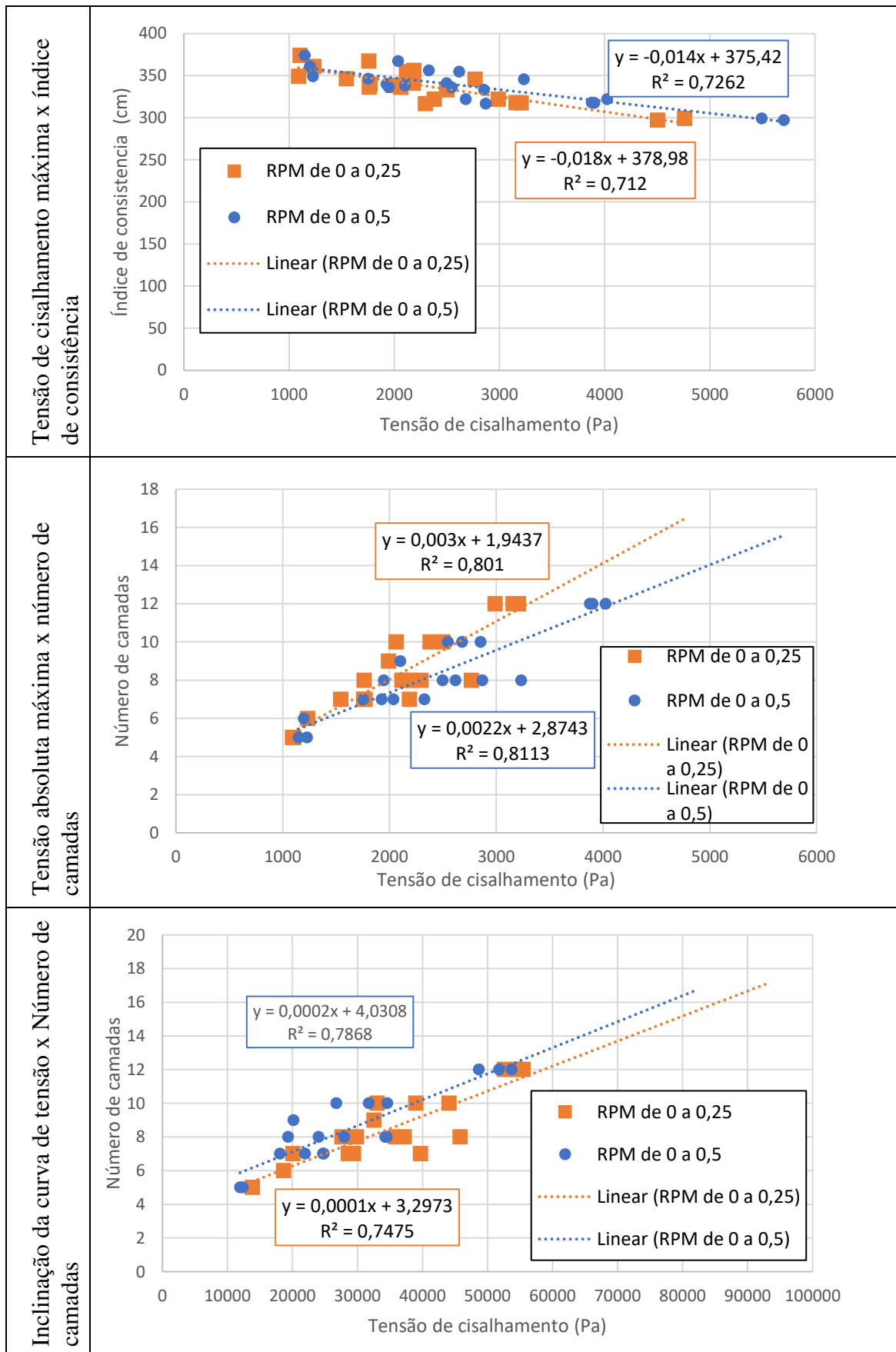
Tabela 2.13 - Reologia seguindo o protocolo de 0 a 0,5 em 300 segundos.

Traço	Tem. Cis. Máx. (Pa)	Torque Máx. (mN*m)	Vel. Rota.do pico (RPM)	Equação e R ² do torque		Equação do trecho linear e R ² da Tensão de Cisalhamento	
				Equação	R ²	Equação	R ²
T0	3876,3	41,303	0,12509	518,45x - 5,5405	0,9934	48656x - 519,94	0,9934
TF0800	2679,7	28,553	0,10507	338,18x - 3,0052	0,9971	31738x - 282,06	0,9971
TF1000	4022,8	42,864	0,10527	571,83x - 4,8082	0,9953	53666x - 451,23	0,9953
TF1400	3900,7	41,563	0,096041	551,61x - 6,1618	0,9938	51768x - 578,28	0,9938
TS1320	5492,2	58,521	0,08681	840,06x - 8,3208	0,9932	78840x - 780,91	0,9932
TS1760	2545,3	27,121	0,12711	284,85x - 1,7787	0,9973	26734x - 166,94	0,9973
TS2640	2036,5	21,7	0,095173	262,8x - 0,6283	0,9984	24663x - 58,949	0,9984
TW0924	5703,9	60,776	0,084425	875,72x - 6,4287	0,9928	82187x - 603,37	0,9928
TW0990	2851,9	30,388	0,10513	368,3x - 3,5428	0,9922	34564x - 332,48	0,9922
TW1912	2496,4	26,6	0,11428	308,13x - 2,8461	0,9945	28917x - 267,09	0,9945
TS1760-1,5-0-0	3232,2	34,44	0,1144	370,34x - 1,1523	0,996	34475x - 99,251	0,9957
TS1760-0-0,5-0	2101,4	22,391	0,11274	214,35x + 0,2897	0,9847	20116x + 27,193	0,9847
TS1760-0-0-1,5	1148,6	12,239	0,12862	127,11x - 0,3785	0,9992	11929x - 35,525	0,9992
TS1760-0,75-0,25-0	2615,9	27,873	0,11923	255,66x - 0,1708	0,9764	23994x - 16,02	0,9764
TS1760-0,75-0-0,75	1197,6	12,761	0,25201	18,855x + 4,9191	0,6837	1769,5x + 461,66	0,6837
TS1760-0-0,25-0,75	2327,2	24,797	0,11339	264,1x + 0,8877	0,9963	24786x - 83,306	0,9963
TS1760-0,5-0,17-0,5	1945,6	20,731	0,11678	205,53x - 0,9535	0,9968	19289x - 89,488	0,9968
TS1760-1-0,08-0,25	1751,8	18,666	0,13701	192,5x - 1,5692	0,9959	18066x - 147,25	0,9959
TS1760-0,25-0,33-0,25	1925,1	20,513	0,10922	233,39x - 2,3509	0,9963	21904x - 220,65	0,9963
TS1760-0,25-0,08-1	1225,8	13,061	0,12107	131,46x - 1,5213	0,9977	12338x - 142,77	0,9977
T _{otm}	2868,1	30,561	0,11185	364,97x - 2,5764	0,9972	34253x - 241,79	0,9972

Fonte: O autor.

Por meio das regressões obtidas, observou-se ser possível correlacionar a reologia rotacional com a construtibilidade (número de camadas). Apesar de apresentar dados distintos ao que tange os valores absolutos para os dois protocolos seguidos, a correlação dos parâmetros segue a mesma precisão estatística, possuindo R^2 próximos para os dois métodos de ensaio. É possível notar também que algumas correlações perdem correspondência estatística quando se troca a tensão de cisalhamento pelo parâmetro de inclinação da curva. A reologia se mostrou uma opção melhor do que o índice de consistência para correlacionar a consistência da argamassa com a construtibilidade, uma vez que, ao realizar a regressão da curva que correlaciona estes dois parâmetros, obteve-se um R^2 de 0,65, diferente do resultado obtido no segundo gráfico da Figura 2.16, que alcançou um R^2 de 0,80, estabelecendo uma correlação melhor e apresentando maior sensibilidade aos dados.

Figura 2.16 - Gráficos das correlações reológicas com parâmetros de impressão.



Fonte: O autor.

2.4 Conclusões

A avaliação da printabilidade apresenta desafios quanto a sua quantificação, uma vez que é um parâmetro qualitativo e que não se há uma padronização entre os autores para a sua avaliação. Neste estudo foi proposto a avaliação utilizando um método nomeado de “HRAP”, de forma que, através de notas dadas para homogeneidade, rugosidade, abatimento e precisão da forma, foi possível quantificar de maneira regular os corpos de prova, porém continua apresentando parâmetros dependentes da interpretação dos autores. Para melhor avaliar a printabilidade, poderia ser utilizado parâmetros mais quantitativos para este fim, de forma que a rugosidade seja medindo os poros em uma determinada área, o abatimento medido avaliando a altura programada e a altura final do corpo de prova, como proposto por Zou *et al.* (2021) e a precisão da forma avaliando a diferença entre a largura prevista para o cordão (diâmetro do bico) e a largura impressa, como foi realizado no artigo.

Para obter um traço com boa printabilidade foi necessário reduzir a capacidade de construtibilidade do material, tal qual na primeira etapa foi possível alcançar 12 camadas enquanto no estudo da aditivção foi atingido somente 9. Para aumentar a construtibilidade é necessário trabalhar com argamassas com maiores tensões de cisalhamento e mais consistentes, necessitando assim de um extrusor mais forte responsável pela conformação do cordão impresso, nos quais é possível relatar que nos traços TS1320 e TW0924, o extrusor atingiu a sua capacidade de torque, acarretando no travamento do fuso e assim a patologia *filament splitting* no corpo de prova.

A medição da tensão de cisalhamento máxima através do ensaio de reometria para a avaliação da construtibilidade se mostrou uma solução mais adequada em comparação ao ensaio de índice de consistência, uma vez que as curvas de regressão linear apresentaram melhores correlações.

Para a impressora de argamassa do Laboratório de estruturas da UFV, na configuração atual, a melhor construtibilidade se deu para a tensão de cisalhamento máxima de 2988,5 Pa variando a velocidade rotacional de 0 a 0,25 rpm em três minutos e de 4022,8 Pa, variando este mesmo parâmetro de 0 a 0,5 rpm no mesmo tempo. Apesar de realizar protocolos distintos de variação de velocidade rotacional, a resposta estatística para correções de curvas apresentou a mesma significância, sendo os dois métodos validados para quantificar a consistência da argamassa e avaliar se este material será possível imprimir no equipamento do laboratório.

A utilização de aditivos modificador de consistência e incorporador de ar, em dosagens específicas, melhorou o comportamento da argamassa quanto a printabilidade e construtibilidade. O ensaio de reometria demonstrou que a consistência possui influência direta como tensão de cisalhamento e, portanto, em quantas camadas serão possíveis empilhar. Já o aditivo plastificante, tornou a argamassa demasiadamente fluida, não sendo adequado para uso em argamassas para impressão 3D.

2.5 Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13276, : Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do índice de consistência, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16541, : Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Preparo da mistura para a realização dos ensaios, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16605, : Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da massa específica, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16916:2021, : Agregado miúdo - Determinação da densidade e da absorção de água, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM248, : Agregados - Determinação da composição granulométrica, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM45, : Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR16372, : NBR 16372: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine), 2015.

BOS, F. *et al.* Additive manufacturing of concrete in construction: potentials and challenges of 3D concrete printing. **Virtual and Physical Prototyping**, [s. l.], v. 11, n. 3, p. 209–225, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/17452759.2016.1209867>.

BUSWELL, R. A. *et al.* 3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 112, p. 37–49, 2018.

DINIZ, H. A. A. **Avaliação da influência da incorporação de metacaulim e das relações areia/ligantes e água/ ligantes nas propriedades de concretos para impressão 3d.** 2023. 133

f. - universidade federal do rio grande do norte, [s. l.], 2023. Disponível em: https://repositorio.ufrn.br/bitstream/123456789/52423/1/Avaliacaoinfluenciaincorporacao_Diniz_2023.pdf.

DOBISZEWSKA, M. *et al.* Utilization of rock dust as cement replacement in cement composites: An alternative approach to sustainable mortar and concrete productions. **Journal of Building Engineering**, [s. l.], v. 69, 2023.

DRUMOND, P. *et al.* Utilização de resíduo de rocha ornamental como filler em argamassa para impressão 3D. *In:* , 2023. **Congresso Sul-Americano de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade**. [S. l.: s. n.], 2023. p. 1–10.

HAN, Y. *et al.* Environmental and economic assessment on 3D printed buildings with recycled concrete. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 278, p. 123884, 2021.

HASSE, J. A. *et al.* Increasing structuration rate of 3D printable concretes: the effect of viscosity enhancing admixtures. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, [s. l.], v. 13, n. 4, p. e13412, 2020. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1983-41952020000400211&tlng=en. Acesso em: 7 jun. 2024.

KAZEMIAN, A. *et al.* Cementitious materials for construction-scale 3D printing: Laboratory testing of fresh printing mixture. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 145, p. 639–647, 2017.

KHAYAT, K. H. Viscosity-enhancing admixtures for cement-based materials — An overview. **Cement and Concrete Composites**, [s. l.], v. 20, n. 2–3, p. 171–188, 1998.

KHOSHNEVIS, B. Automated construction by contour crafting—related robotics and information technologies. **Automation in Construction**, [s. l.], v. 13, n. 1, p. 5–19, 2004.

LEEMANN, A.; WINNEFELD, F. The effect of viscosity modifying agents on mortar and concrete. **Cement and Concrete Composites**, [s. l.], v. 29, n. 5, p. 341–349, 2007.

LIM, S. *et al.* Developments in construction-scale additive manufacturing processes. **Automation in Construction**, [s. l.], v. 21, n. 1, p. 262–268, 2012.

LU, B. *et al.* A systematical review of 3D printable cementitious materials. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 207, p. 477–490, 2019.

LUCEN, H. *et al.* The synergistic effect of greenhouse gas CO₂ and silica fume on the properties of 3D printed mortar. **Composites Part B: Engineering**, [s. l.], v. 271, p. 111188, 2024.

MA, G.; LI, Z.; WANG, L. Printable properties of cementitious material containing copper tailings for extrusion based 3D printing. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 162, p. 613–627, 2018.

MENDES, B. C. **Reaproveitamento do rejeito de minério de ferro, liberado no desastre envolvendo o rompimento da barragem de Fundão (MG), na produção de blocos cerâmicos**. [S. l.: s. n.], 2019. Disponível em: <https://locus.ufv.br/handle/123456789/25135>.

MENDES, J. **Viabilidade técnica do uso de Linear Alquil Benzeno Sulfonato de Sódio como aditivo incorporador de ar para matrizes cimentícias**. 2016. [s. l.], 2016.

MENNA, C. *et al.* Opportunities and challenges for structural engineering of digitally fabricated concrete. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 133, p. 106079, 2020.

MOHAN, M. K. *et al.* Rheological and pumping behaviour of 3D printable cementitious materials with varying aggregate content. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 139, p. 106258, 2021.

PEGNA, J. Exploratory investigation of solid freeform construction. **Automation in Construction**, [s. l.], v. 5, n. 5, p. 427–437, 1997.

PILAR, R. *et al.* Rheological behavior of low shrinkage very high strength self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 286, p. 122838, 2021.

REIS, A. S. dos; ALVAREZ, cristina engel de. A sustentabilidade e o resíduo gerado no beneficiamento das rochas ornamentais. *In:* , 2007. **Anais [...]**. [S. l.: s. n.], 2007. p. 10. Disponível em: <https://lpp.ufes.br/sustentabilidade-e-o-residuo-gerado-no-beneficiamento-das-rochas-ornamentais>. Acesso em: 23 jun. 2024.

ROBAYO-SALAZAR, R. *et al.* 3D printing with cementitious materials: Challenges and opportunities for the construction sector. **Automation in Construction**, [s. l.], v. 146, p. 104693, 2023.

ROUSSEL, N. Rheological requirements for printable concretes. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 112, p. 76–85, 2018.

ŞAHİN, O. *et al.* Construction and demolition waste-based geopolymers suited for use in 3-dimensional additive manufacturing. **Cement and Concrete Composites**, [s. l.], v. 121, p. 104088, 2021.

SCHEFFÉ, H. Experiments with Mixtures. **Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)**, [s. l.], v. 20, n. 2, p. 344–360, 1958. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.2517-6161.1958.tb00299.x>.

SCHMIDT, W. *et al.* Rheology Modifying Admixtures: The Key to Innovation in Concrete Technology – A General Overview and Implications for Africa. **Chemistry of Materials Research**, [s. l.], v. 5, p. 115–120, 2013.

SILVA, R. V.; DE BRITO, J.; DHIR, R. K. Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 65, p. 201–217, 2014.

WANGLER, T. *et al.* Digital Concrete: Opportunities and Challenges. **RILEM Technical Letters**, [s. l.], v. 1, p. 67, 2016.

WENG, Y. *et al.* Comparative economic, environmental and productivity assessment of a concrete bathroom unit fabricated through 3D printing and a precast approach. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 261, p. 121245, 2020.

ZOU, S. *et al.* On rheology of mortar with recycled fine aggregate for 3D printing. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 311, p. 125312, 2021.

CAPÍTULO 3: COMPORTAMENTO MECÂNICO DA ARGAMASSA PARA IMPRESSÃO 3D COM DIFERENTES PADRÕES DE IMPRESSÃO

Pedro Henrique Cota Drumond¹

¹Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 36570-900, Brasil.

RESUMO

A impressão 3D de materiais cimentícios tem demonstrado avanços na área da construção civil nos últimos anos, possibilitando a impressão de estruturas e edificações pelo mundo. No entanto, trata-se de uma tecnologia emergente e as pesquisas sobre as propriedades mecânicas do concreto endurecido impresso em 3D apresentam alguns resultados inconsistentes, já que dependem diretamente da impressora utilizada. Além disso, ainda não existem normas que estabeleçam parâmetros para o processo de moldagem de corpos de prova impressos e para correlacionar a possível perda de resistência mecânica decorrente do processo de impressão. Na literatura, há estudos sobre a influência do método de moldagem e do caminho de impressão dos corpos de prova de argamassa impressa em 3D, porém não foram identificados estudos sobre a influência do método de corte no comportamento mecânico desses elementos. Este artigo busca avaliar a influência das diferentes metodologias de produção de corpos de prova de argamassa impressa, como os efeitos do caminho de impressão e do tipo de corte, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido. A influência dessas metodologias foi avaliada através de ensaios mecânicos de compressão, tração na flexão, cisalhamento e aderência entre camadas. Para fins de comparação, também foram produzidos corpos de prova de argamassa moldados de acordo com normas brasileiras e europeias. Os resultados demonstraram que os corpos de prova moldados apresentaram resistências superiores à argamassa impressa, sem adensamento, bem como há perda de resistência dependendo do sentido de impressão devido à anisotropia da argamassa impressa em 3D. Ademais, acredita-se que o corte da argamassa no estado fresco acarretou em mais danos ao material, já que foram observadas menores resistências em praticamente todos os ensaios mecânicos realizados em comparação aos resultados dos corpos de prova impressos e cortados no estado endurecido.

Palavras-chave: 3DPC; Padrão de impressão; Ensaio mecânicos; Resíduo de granito.

3.1 Introdução

A impressão 3D de materiais cimentícios tem se mostrado uma tecnologia promissora devido a diversas vantagens: economia de material e mão de obra, alta eficiência etc. (Buswell *et al.*, 2018; Ji *et al.*, 2019; Lee *et al.*, 2019). Desta forma, a manufatura aditiva de materiais cimentícios tem sido utilizada para produzir obras por todo o mundo, como alguns projetos pioneiros: a passarela ciclística impressa e estudada por Salet *et al.* (2018), a subestação de distribuição de energia construída na China por Kazemian *et al.* (2017) e um demonstrativo arquitetônico em escala real realizado por Hack *et al.*, (2020), evidenciando grande potencial construtivo e tecnológico da fabricação digital (Meurer; Classen, 2021).

Uma das grandes vantagens da manufatura aditiva de materiais em pastas é a sua característica *free-of-formwork* (livre de formas) (LE *et al.*, 2012; Sun; *et al.*, 2017), porém esta característica combinada com a forma de construir *layer-upon-layer* (camada sobre camada) concede ao objeto, no estado endurecido, comportamento anisotrópico quanto à resistência mecânica (Padilha, 2020; Zou *et al.*, 2021). Devido a estas características, em especial a de sobreposição de camadas, o material impresso possui um favorecimento de abertura de fissuras, gerando um caminho preferencial para a propagação de falhas. Peças ou regiões submetidas a tração necessitam de reforço para aumentar a resistência do elo mais fraco ao que tange a resistência de um componente impresso (Kloft *et al.*, 2020; Nerella; Hempel; Mechtcherine, 2019). Segundo Robayo-Salazar *et al.* (2023), uma das formas mais eficazes de reduzir este comportamento anisotrópico é através da adição de fibras dispersas aleatoriamente na pasta.

A impressão 3D modifica as propriedades intrínsecas dos materiais cimentícios, tornando as metodologias convencionais de teste inadequadas para avaliar com precisão a resistência do material impresso, que apresenta comportamento anisotrópico ou ortotrópico ao se tratar do comportamento estrutural variando a direção de impressão (Alami, A. H. *et al.*, 2023; Kruger; van Zijl, 2021; Rehman; Kim, 2021). Diversos autores realizam ensaios mecânicos em mais de uma direção de impressão, analisando a influência das junções dos cordões com a perda de resistência. Joh *et al.* (2020a) notaram uma redução de 68% de resistência à compressão ao comparar o desempenho de corpos de prova moldados com impressos, havendo ainda uma diferença de cerca de 24% ao comparar a direção de impressão. Rubin (2021) verificou que a perda de resistência do corpo de prova moldado para o impresso variou em função dos traços estudados, indo de 20% até 38% de perda. Kruger e Van Zijl (2021) realizaram uma revisão bibliográfica de forma que foi identificado diversos artigos que utilizaram impressão 3D de materiais cimentícios em diferentes direções de impressão e avaliado a falta de fusão de

camadas. Neste levantamento foi indicado a redução de 45,6% na resistência mecânica dos corpos de prova impressos, apresentando também um alto coeficiente de variação (aproximadamente 54%), revelando uma grande variação nos dados obtidos, de forma que cada uma das impressoras e argamassas apresentavam diferentes razões entre os corpos de prova impressos e moldados. Os autores justificam esta diferença de resistência a um fenômeno similar ao de formação de juntas frias, de forma que, entre uma camada e outra, não há a consolidação completa do concreto ou argamassa, gerando um caminho de preferência de abertura de fissuras.

Wolfs, Bos e Salet (2019) realizaram um estudo sobre a influência da direção de impressão no processo de adesão entre as camadas, avaliando também a influência entre os tempos de impressão entre uma camada e outra. Assim como no levantamento realizado por Kruger e Van Zijl (2021), as tensões resistentes dos corpos de prova impressos foram inferiores às tensões dos corpos de prova moldados, de forma que, a tensão de compressão apresentou redução de 32,6% e o ensaio de tração na flexão apresentou uma redução de 60%. Quanto à direção de impressão, o ensaio de flexão apresentou uma redução de aproximadamente 14% da direção favorável ao aparecimento de fissuras (cordões transversais) e a direção principal (cordões longitudinais).

Na Tabela 3.2 os tamanhos de corpos de prova, os ensaios realizados e resultados obtidos por alguns autores.

Este artigo apresenta uma análise comparativa entre corpos de prova impressos diretamente e aqueles moldados seguindo técnica tradicional de adensamento, avaliando a eficácia de cada método na representação das propriedades mecânicas da argamassa impressa. No caso dos corpos de prova impressos, a influência do método de corte na resistência mecânica da argamassa impressa em 3D também é avaliada considerando dois tipos de cortes: com a argamassa em estado fresco e em estado endurecido.

3.2 Materiais e métodos

Nesta seção está apresentada a metodologia utilizado no desenvolvimento do trabalho, abrangendo a caracterização dos materiais, a produção dos corpos de prova de argamassa impressos e moldados e os ensaios mecânicos realizados.

Tabela 3.1 – Dimensões, tipos de corte e ensaios realizados por diversos autores.

Autor	Nomenclatura	Dimensões	Tipo de corte	Resultado (Mpa)			
				Com	Fle	Cis	Aec
Lucen <i>et al.</i> (2024)	SF0	5x5x5 cm	Corte endurecido	69	-	-	-
	SF1			71	-	-	-
	SF2			75	-	-	-
	SF5			71	-	-	-
Ma; Li; Wang (2018)	R0	Não informou	Corte endurecido	44	-	-	-
	R10			43	-	-	-
	R20			45	-	-	-
	R30			47	5,4	-	-
	R40			53	-	-	-
	R50			44	-	-	-
(Rubin, 2021)	TREF	4x4x4 cm	Corte fresco	57,4	14,85	-	2,98
	T2AC	4x4x16 cm		46,9	14,12	-	3,67
	T4AC	5x4x5 cm		56,4	17,52	-	3,56
Joh <i>et al.</i> (2020a)	Mono	Com – 4x4x4 cm Fle – 4x4x16 cm	Corte Endurecido	72,8	11,9	-	-
	D1			23,5	6,5	-	-
	D1-M			24,6	18,5	-	-
	D2			31	6,1	-	-
	D2-M			24	11,0	-	-
Legenda: Com – compressão; Fle – Flexão; Cis – Cisalhamento; Aec – Arrancamento entre camadas.							

Fonte: O autor

3.2.1 Caracterização dos materiais

Para a fabricação da argamassa dos corpos de prova impressos, elaborou-se um traço com substituição de parte do cimento *Portland* por *filler*, composto por resíduo de rocha ornamental, e com aditivos modificador de viscosidade (*STABI520*) e incorporador de ar (*AIR200*), para auxiliar na construtibilidade, na coesão e no tempo de trabalho da argamassa. O traço adotado e a relação água/finos (*a/f*) estão descritos na Tabela 3.2. A produção dos corpos de prova moldados foi realizada a partir do mesmo traço.

Tabela 3.2 – Traço adotado para impressão 3D e moldagem dos corpos de prova de argamassa.

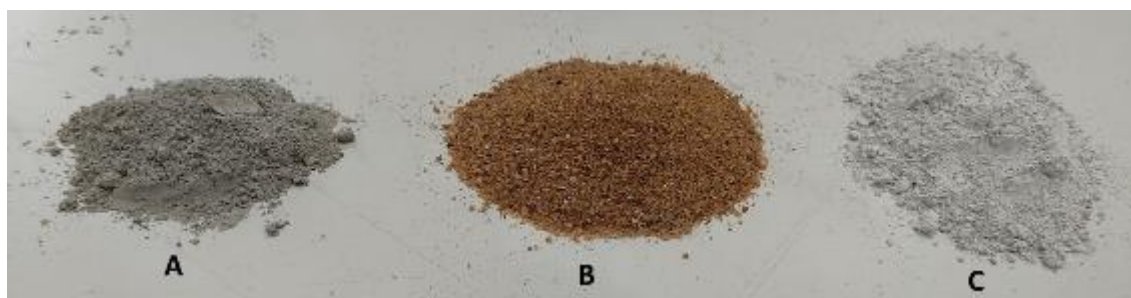
Cimento	Filler	Areia	Água	STABI520	AIR200	Relação <i>a/f</i>
1,000	1,200	1,760	0,968	0,667%	0,278%	0,440

Fonte: O autor

Foi utilizado o Cimento *Portland* CP-III 32 RS, este possui massa específica de 2,92 g/cm³, determinada através da ABNT NBR 1660:2017 e, área específica de 464,41 m²/kg, determinada através da ABNT NBR 16372:2015. Este cimento foi escolhido por possuir um baixo calor de hidratação e uma pega lenta, de forma a reduzir o aparecimento de fissuras por retração e maior tempo de trabalho da argamassa. Este tipo de cimento é um dos menos recomendado para a utilização em impressão 3D, uma vez que possui grandes grãos,

dificultando a hidratação e possui pega lenta, tornando difícil o ganho de construtibilidade devido ao endurecimento precoce, tendo ciência de todos os pontos negativos deste tipo de cimento, ele foi utilizado para avaliar o comportamento da impressão em umas das situações menos favoráveis para a manufatura aditiva, de forma que a utilização de outros tipos de cimentos podem trazer ganhos ainda maiores para o método de construção.

Figura 3.1 – Materiais utilizados para a produção das amostras: (a) cimento CP-III 32 RS; (b) areia natural de rio; (c) filler de rocha ornamental.



Fonte: o autor.

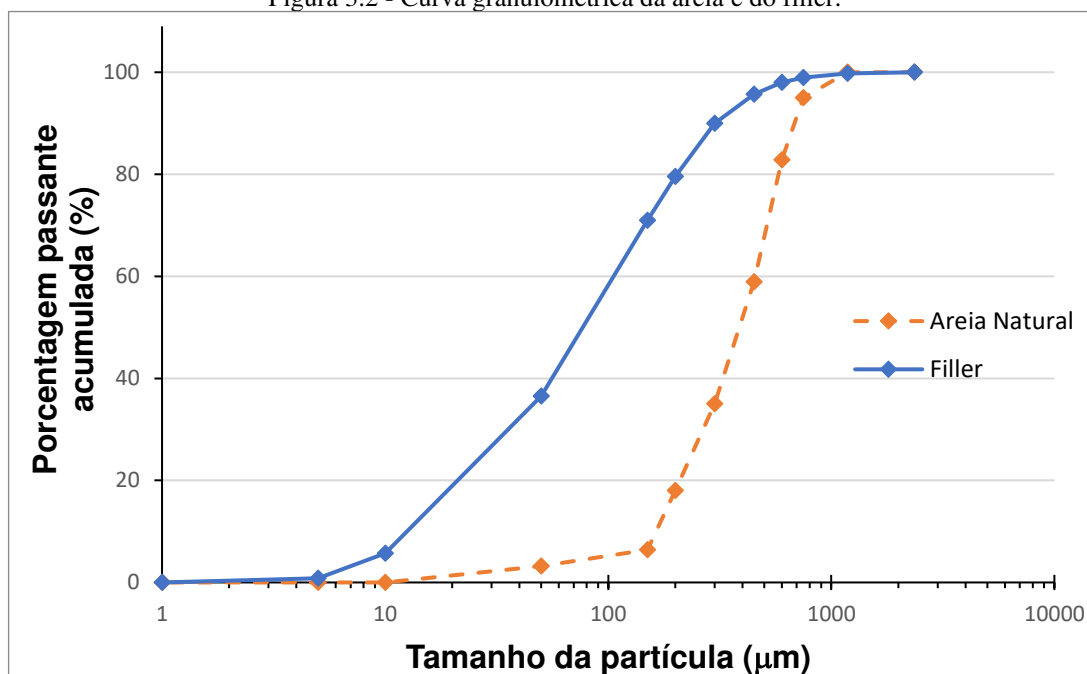
O agregado miúdo utilizado foi a areia natural de rio, peneirada na peneira número 16, com dimensão máxima do agregado de 1,18 mm. O agregado miúdo possui massa unitária média de $1,397\text{g/cm}^3$, definida através da ABNT NBR NM45:2021, granulometria e modulo de finura de 1,76, definido seguindo os parâmetros da ABNT NBR NM248:2003, na Figura 3.2, é mostrado a curva granulométrica da areia na cor laranja com o traço tracejado. O agregado miúdo apresenta também absorção de 0,91% e massa específica saturada superfície seca de $2,68\text{g/cm}^3$, de acordo com a ABNT NBR 16916:2021.

O Brasil é o quinto maior produtor mundial de rochas ornamentais. Para beneficiá-las, é necessário cortar as rochas brutas em placas, usando água para resfriar e lubrificar as lâminas. A água usada contém material particulado e precisa ser tratada para separar os resíduos sólidos, que são ambientalmente nocivos (Reis; Alvarez, 2007), podendo ser utilizado como material inerte em argamassas, preenchendo os vazios do material por ser um material extremamente fino (Dobiszewska *et al.*, 2023).

O *filler* utilizado foi o resíduo de rocha ornamental coletado em Cachoeiro do Itapemirim – ES. O material foi coletado em forma pastosa, ainda úmida, passando pelo processo de secagem ao ar, secagem em estufa e no final por destorroamento. Após o destorroamento, o material passou pelo moinho de bolas por 30 minutos para diminuir sua granulometria. Por fim, o material apresenta massa específica de $2,65\text{g/cm}^3$ ensaiado através da ABNT NBR

1660:2017, área específica de 744,79 m²/kg, determinada através da ABNT NBR 16372:2015 e curva granulométrica realizada pelo granulômetro a laser modelo *betersize* 2000, conforme Figura 3.2 em faixa azul e contínua.

Figura 3.2 - Curva granulométrica da areia e do filler.



Fonte: O autor.

Foram utilizados 2 aditivos da empresa MC Bauchemie: o modificador de consistência *STABI520* e o incorporador de ar (*AIR200*). Os aditivos foram utilizados respeitando-se a recomendação de utilização máxima indicada pelo fabricante de 0,5% da massa de cimento para o aditivo incorporador de ar e 1,5% da massa de cimento do modificador de consistência.

3.2.2 Produção dos corpos de prova

Para realizar uma análise comparativa entre corpos de prova impressos e moldados, foram testadas três diferentes metodologias de produção de corpos de prova de argamassa, devido à ausência de uma metodologia específica para a produção de CPs impressos. Foram produzidos CPs moldados, CPs impressos e cortados com a argamassa no estado fresco, CPs impressos e cortados no estado endurecido. Esses corpos de prova foram submetidos a ensaios mecânicos de resistência à compressão, à tração na flexão, ao cisalhamento e de aderência entre camadas. O processo de mistura dos traços seguiu tempos definidos para cada etapa, desde a homogeneização do material seco até após a adição da água, para garantir que a energia de amassamento fornecida fosse sempre a mesma. Na Tabela 3.3 estão identificados os tempos de mistura dos materiais, sendo que os processos de homogeneização mecânica e manual foram

intercalados para garantir que nenhum material ficasse seco no fundo do misturador e que todo o material fosse hidratado.

Tabela 3.3 - Tempos de misturas dos materiais.

Processo	Tempo (min)	Tempo acumulado (min)
1) Homogeneização mecânica areia e <i>filler</i>	2	2
2) Adição do cimento e homogeneização mecânica	2	4
3) Adição da água e aditivos e homogeneização mecânica	2	6
4) Homogeneização manual	3	9
5) Homogeneização mecânica	3	12
6) Homogeneização manual	2	14
7) Homogeneização mecânica	1	15

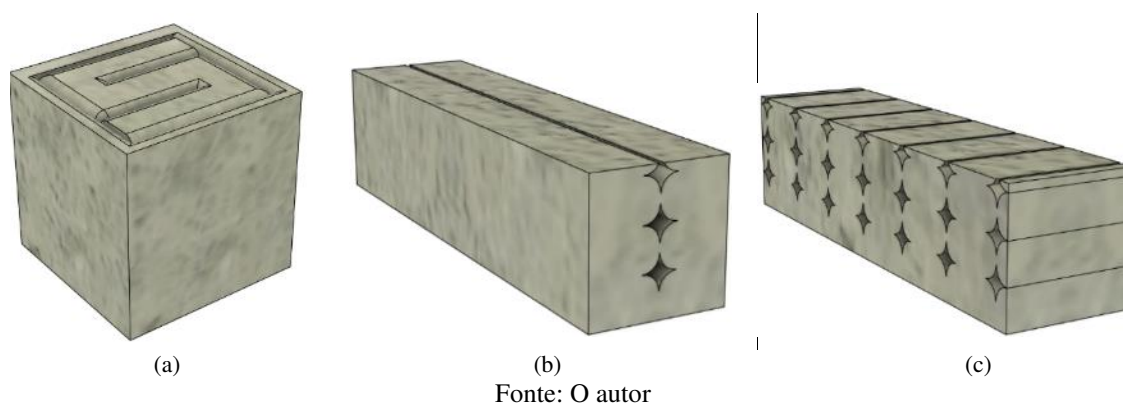
Fonte: O autor.

Os CPs moldados para a realização dos ensaios de resistência à compressão foram produzidos em formato cúbico, com dimensões 10×10×10 cm, segundo a BS EN 12390-1:2012, adotando-se a moldagem em duas camadas com compactação de 25 golpes por camada. Os CPs moldados para a realização dos ensaios de resistência à tração na flexão e de resistência ao cisalhamento foram produzidos em formato prismático com dimensões de 4×4×16 cm, segundo as prescrições da ABNT NBR 13279:2005. O adensamento foi realizado a partir da Mesa de Abatimento de Argamassa em duas camadas de 30 golpes cada.

Os corpos de prova impressos também foram produzidos em formato cúbico e em formato prismático. Os sentidos de impressão definidos estão mostrados na Figura 3.3. Os CPs prismáticos foram produzidos com duas direções de impressão distintas, sendo uma longitudinal e outra transversal, no intuito de avaliar a influência do caminho de impressão sobre a resistência à tração na flexão e ao cisalhamento. Os CPs impressos utilizados nos ensaios de aderência entre camadas foram produzidos com uma seção transversal de 5x5 cm e altura equivalente à de três camadas impressas, sendo cada camada com cerca de 1,25 cm.

Todos os corpos de prova impressos foram posteriormente cortados para adequação às dimensões de ensaio prescritas pela BS EN 12390-1:2012, para os corpos de prova cúbicos, e pela ABNT NBR 13279:2005, para os corpos de prova prismáticos. A metodologia de corte também foi avaliada: 50% dos corpos de prova impressos foram cortados no estado endurecido e 50% no estado fresco.

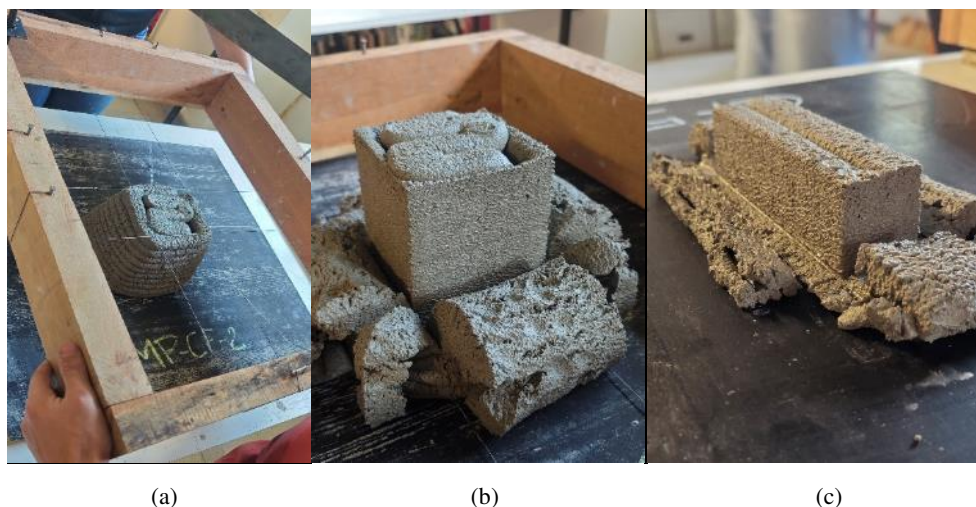
Figura 3.3 – Direção de impressão dos corpos de prova impressos. (a) Cúbico; (b) prismático longitudinal; (c) prismático transversal.



O corte em estado endurecido foi realizado a partir de uma serra circular de bancada com disco diamantado, após 20 dias de cura submersa em água saturada de hidróxido de cálcio. Contudo, como o processo de corte no estado endurecido é moroso, propôs-se uma metodologia de corte no estado fresco, utilizando um aparato simples produzido com madeira e fio de nylon, que agiliza consideravelmente o processo de corte dos corpos de prova. O aparato e o processo de corte dos corpos de prova no estado fresco estão mostrados na Figura 3.4.

Foram efetuados testes preliminares para a definição do tempo de corte no estado fresco, que consistiram em cortes feitos em uma camada de argamassa impressa. Essa camada do material cimentício foi submetida a cortes em intervalos regulares de 3 minutos. A cada intervalo de corte, foi realizada uma inspeção visual para avaliar a consistência e estado do corte da argamassa, utilizando dois critérios principais: a reunião das camadas e a precisão do corte. Observou-se, no início do processo, que as camadas cortadas se juntavam novamente, indicando que o material ainda não havia atingido uma consistência adequada para manter a precisão do corte. Além disso, avaliou-se a definição das bordas cortadas, para que os cortes estivessem precisos e com bordas bem definidas, indicando que a argamassa estava suficientemente consistente para ser cortada sem deformações posteriores. O tempo ideal de corte foi definido como o intervalo após a impressão em que as camadas não se reuniam mais e os cortes apresentavam precisão, garantindo que os corpos de prova pudessem ser ajustados às dimensões normativas sem comprometer a integridade estrutural do material. Após os ensaios, determinou-se que o tempo de corte ideal para a argamassa impressa em estudo era de 50 minutos após a impressão.

Figura 3.4 – Processo de corte no estado fresco. (a) Aparato de corte; (b) corte dos corpos de prova cúbicos; (c) corte dos corpos de prova prismáticos.



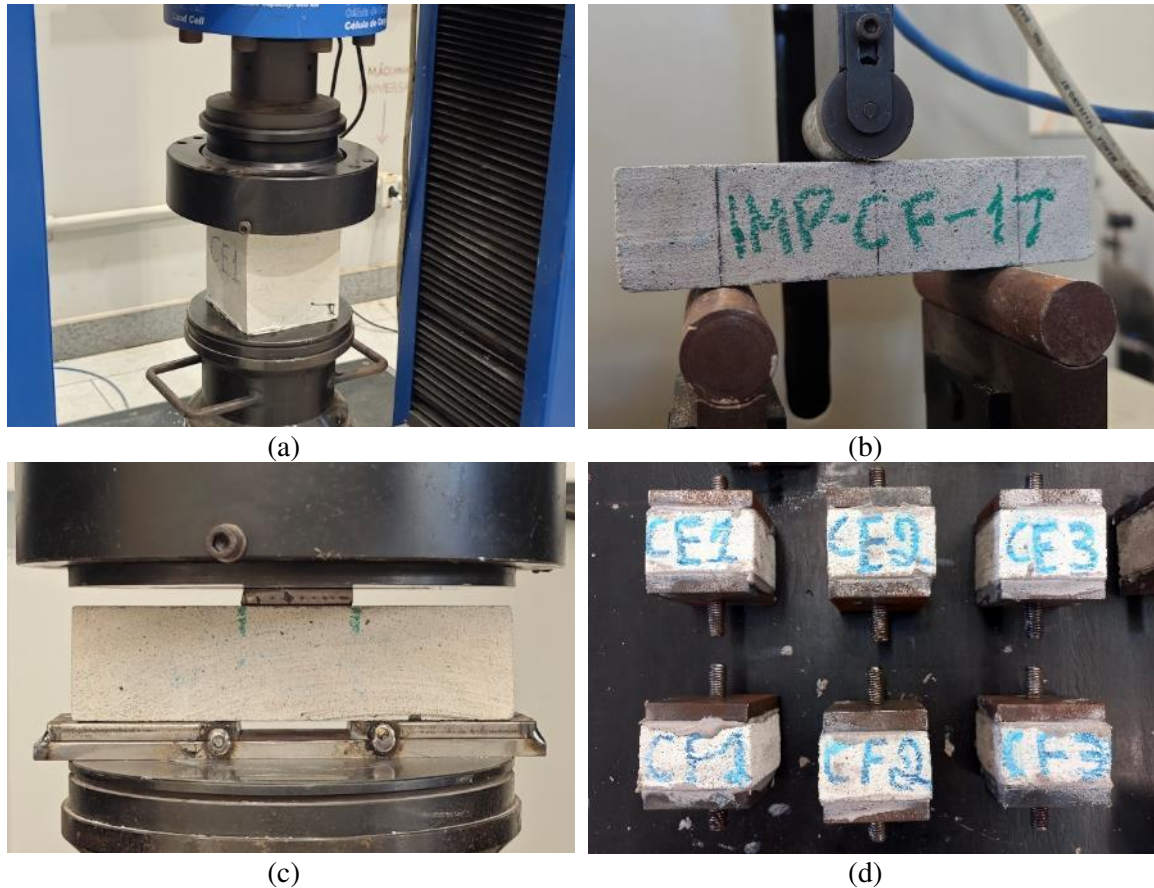
Fonte: O autor

A cura dos corpos de prova impressos e moldados foi realizada em solução saturada de hidróxido de cálcio, conforme a ABNT NBR 5738:2015.

3.2.3 Ensaios mecânicos

Os ensaios mecânicos foram realizados com o objetivo de avaliar a influência do tipo de moldagem, da direção de impressão e do tipo de corte na resistência mecânica dos corpos de prova de argamassa. Os ensaios de resistência à compressão foram realizados em corpos de prova cúbicos com dimensões de 10x10x10 cm, seguindo as prescrições da norma britânica BS EN 12390-3:2019 (Figura 3.5a). Os ensaios de resistência à tração na flexão foram conduzidos em CPs prismáticos com dimensões de 4x4x16 cm, conforme as especificações da ABNT NBR 13279:2005 (Figura 3.5b). Os ensaios de resistência ao cisalhamento foram realizados de maneira similar ao apresentado por Bayrak *et al.* (2024); Licciardello *et al.*, (2022) e UNI EN 1052-3 (2002), aplicando uma taxa de carregamento constante de 100 N/s (Figura 3.5c). Por fim, os ensaios de aderência entre camadas foram realizados conforme descrito por (Christen; van Zijl; de Villiers, 2022), com taxa de incremento de carregamento constante de 0,019 MPa/s (Figura 3.5d). Todos os ensaios foram realizados utilizando-se a máquina universal de ensaios EMIC DL-60000.

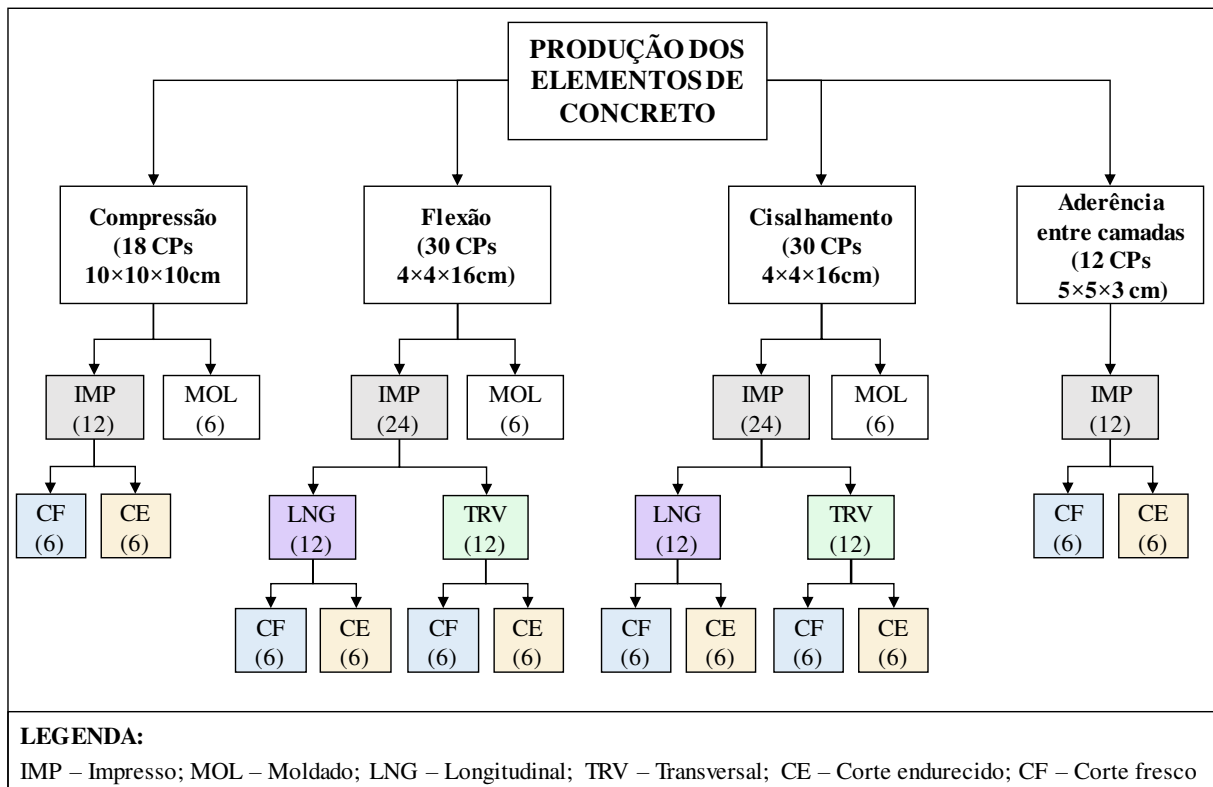
Figura 3.5 – Configuração dos ensaios: (a) compressão; (b) tração na flexão; (c) cisalhamento; (d) aderência entre camadas.



Fonte: O autor.

Para o ensaio de resistência à compressão, foram preparados 12 corpos de prova impressos, dos quais 6 foram cortados no estado fresco e 6 no estado endurecido. Para o ensaio de resistência à tração na flexão, foram produzidos 30 corpos de prova prismáticos: 6 moldados e 24 impressos. Dos 24 impressos, 12 foram cortados com direção de impressão transversal (6 no estado fresco e 6 no estado endurecido) e 12 com direção de impressão longitudinal (6 no estado fresco e 6 no estado endurecido). Para o ensaio de cisalhamento, também foram produzidos 30 corpos de prova prismáticos: 6 moldados e 24 impressos, com as mesmas distribuições de direção de impressão e estado de corte. Adicionalmente, foram produzidos 12 corpos de prova para o ensaio de aderência entre camadas, sendo 6 cortados no estado fresco e 6 no estado endurecido. Na Figura 3.6 é apresentado um organograma com o número e o tipo dos corpos de prova produzidos para a realização de cada um dos ensaios.

Figura 3.6 – Organograma de produção dos elementos de argamassa.



Fonte: O autor.

3.3 Resultados

Neste tópico, apresentam-se os resultados dos ensaios de resistência à compressão, à tração na flexão, ao cisalhamento e de aderência entre camadas.

3.3.1 Ensaios de resistência à compressão

Apresentam-se, na Tabela 3.4, os resultados médios (média de 6 CPs) dos ensaios de resistência à compressão (COM), realizados nos corpos de prova impressos (IMP), cortados no estado fresco (CF) e no estado endurecido (CE), e nos corpos de prova moldados (MOL). Os resultados individuais estão no apêndice B Na Tabela B.1. Na Figura 3.7 apresenta-se um gráfico como forma de resumo destas informações.

Tabela 3.4 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão - média de 6 CPs.

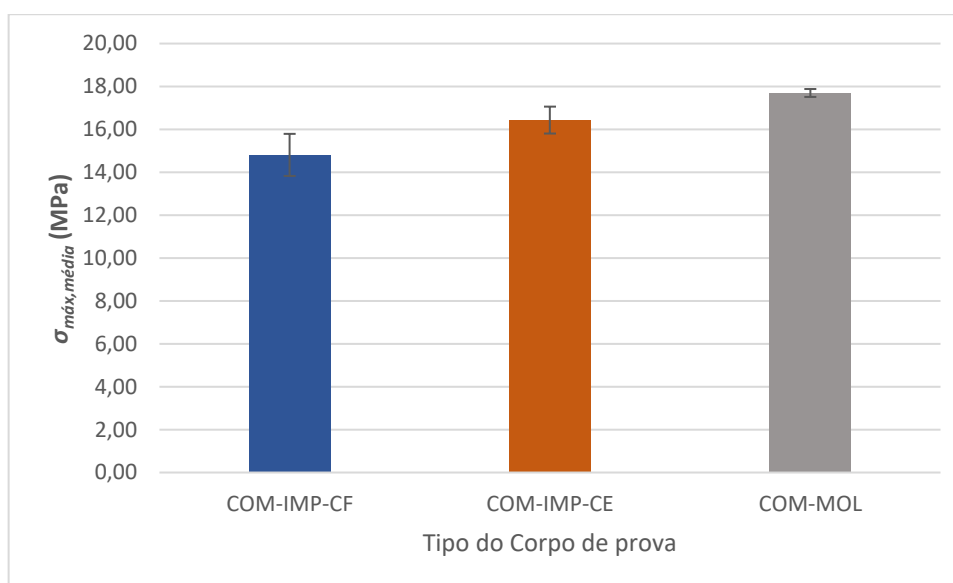
ID	L_{med} (mm)	b_{med} (mm)	h_{med} (mm)	Massa esp. (kgf/m ³)	$F_{máx,média}$ (kgf)	$\sigma_{máx,média}$ (MPa)	Desv. pad. (MPa)	CV (%)
COM-IMP-CF	100,47	100,57	102,19	1908,90	15252,36	14,81	0,98	6,63
COM-IMP-CE	99,31	98,71	102,13	1922,87	16419,03	16,43	0,63	3,82
COM-MOL	101,46	100,93	102,61	1904,75	18471,16	17,70	0,18	1,04

Fonte: O autor.

A partir dos resultados, nota-se que a máxima tensão resistente obtida para os corpos de prova impressos cortados no estado fresco (IMP-CF) e no estado endurecido (IMP-CE) foram,

respectivamente, 16,3% e 7,1% menores que os resultados de resistência à compressão obtidos a partir dos corpos de prova moldados. Também se observa um coeficiente de variação mais elevado no caso dos corpos de prova impressos cortados no estado fresco. Em relação à massa específica, ao contrário do esperado, os corpos de prova adensados apresentaram massa específica menor que a dos corpos de prova impressos. Além disso, observa-se uma variação da massa específica de apenas $\pm 2,2\%$ em torno da média.

Figura 3.7 – Gráfico das tensões de compressão uniaxial de cada tipo do corpo de prova.



Fonte: O autor.

3.3.2 Ensaios de resistência à tração na flexão

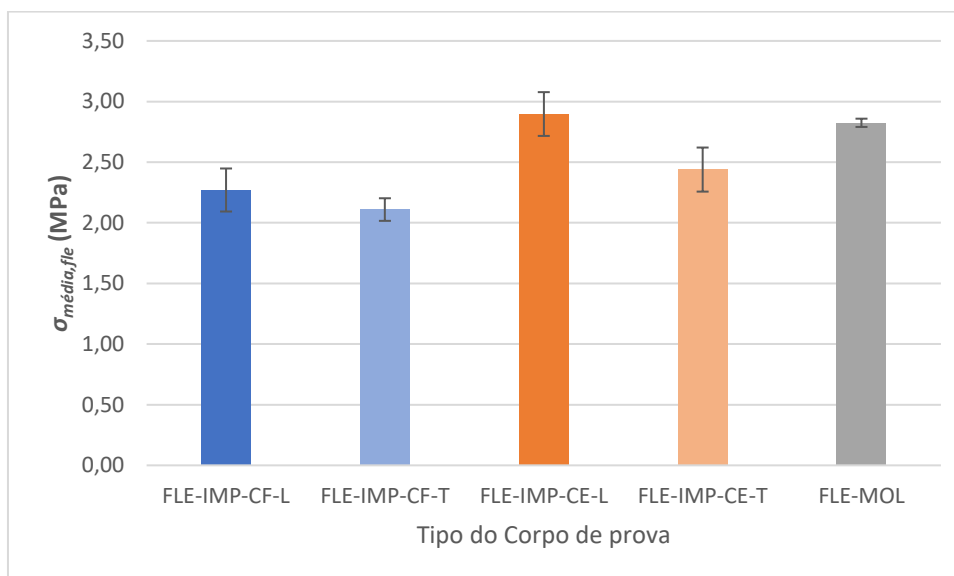
Apresentam-se, na Tabela 3.5, os resultados médios dos ensaios de resistência à tração na flexão (FLE) realizados nos corpos de prova impressos (IMP), no sentido longitudinal (L) e transversal (T), cortados no estado fresco (CF) e no estado endurecido (CE), e nos corpos de prova moldados (MOL). Os resultados individuais estão no apêndice B Na Tabela B.2. Na Figura 3.8 é apresentado um resumo das informações de tensão média de flexão em forma de gráfico.

Tabela 3.5 – Resultados dos ensaios de resistência à tração na flexão.

ID	L_{med} (mm)	b_{med} (mm)	h_{med} (mm)	Massa esp. (kgf/m ³)	$F_{méd, fle}$ (kgf)	$\sigma_{méd, fle}$ (MPa)	Desv. pad. (MPa)	CV (%)
FLE-IMP-CF-L	160,16	41,05	40,59	1870,60	104,58	2,27	0,18	7,82
FLE-IMP-CF-T	160,39	41,42	39,93	1855,93	94,72	2,11	0,09	4,42
FLE-IMP-CE-L	161,35	40,04	41,01	1887,42	132,56	2,90	0,18	6,23
FLE-IMP-CE-T	161,42	41,84	40,98	1894,11	117,22	2,44	0,18	7,45
FLE-MOL	160,40	40,65	40,58	1899,86	128,49	2,82	0,03	1,21

Fonte: O autor.

Figura 3.8 – Gráfico das tensões de tração na flexão de cada tipo do corpo de prova.



Fonte: O autor.

Nota-se, a partir dos resultados da Tabela 3.5, que no caso dos corpos de prova impressos cortados no estado fresco (IMP-CF), os CPs com direção de impressão transversal (T), apresentaram uma resistência à tração na flexão 7% inferior à resistência dos CPs com direção de impressão longitudinal (L). No caso dos corpos de prova impressos cortados no estado endurecido (IMP-CE), os CPs com direção de impressão transversal (T) apresentaram uma resistência à tração na flexão 16% inferior à resistência dos CPs com direção de impressão longitudinal (L). Em relação ao tipo de corte, os CPs cortados no estado fresco apresentaram resistência à tração na flexão, em média, 18% menor do que aqueles cortados no estado endurecido. Comparando-se os corpos de prova impressos aos moldados, observa-se que os corpos de prova impressos e cortados no estado fresco (IMP-CF) apresentaram resistência à tração na flexão, em média, 22,5% inferior à resistência dos corpos de prova moldados, enquanto os impressos e cortados no estado endurecido (IMP-CE) apresentaram resistência, em média, 5,5% inferior aos CPs moldados. Ressalta-se que os CPs IMP-CE-L apresentaram resistência mais elevada que os corpos de prova moldados. Quanto à massa específica, observa-se que houve uma variação de apenas $\pm 1,4\%$ em torno da média.

3.3.3 Ensaios de resistência ao cisalhamento

Apresentam-se, na Tabela 3.6, os resultados dos ensaios de resistência ao cisalhamento (CIS) realizados nos corpos de prova impressos (IMP), no sentido longitudinal (L) e transversal (T), cortados no estado fresco (CF) e no estado endurecido (CE), e nos corpos de prova moldados (MOL). Os resultados individuais estão no apêndice B Na Tabela B.3

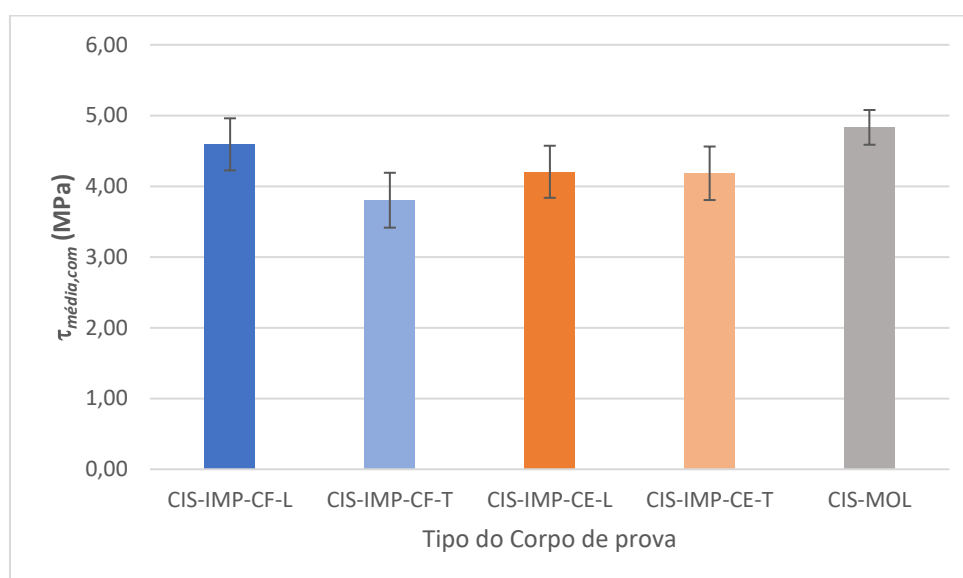
Tabela 3.6 – Resultados dos ensaios de resistência ao cisalhamento.

ID	L_{med} (mm)	b_{med} (mm)	h_{med} (mm)	Massa esp. (kgf/m ³)	$F_{méd,comp}$ (kgf)	$\tau_{média,com}$ (MPa)	Desv. pad. (MPa)	CV (%)
CIS-IMP-CF-L	157,18	40,70	41,17	1903,76	1567,40	4,59	0,37	8,02
CIS-IMP-CF-T	158,64	41,08	40,97	1898,17	1306,11	3,80	0,39	10,20
CIS-IMP-CE-L	164,53	42,31	41,41	1889,19	1500,67	4,21	0,37	8,75
CIS-IMP-CE-T	163,67	41,77	40,04	1900,45	1433,60	4,18	0,38	9,04
CIS-MOL	160,31	40,38	40,42	1934,07	1607,91	4,83	0,25	5,08

Fonte: O autor.

Na Figura 3.9 abaixo é possível observar o gráfico-resumo das diferenças de tensões entre os modelos de corpos de prova.

Figura 3.9 – Gráfico das tensões de tensão de cisalhamento de cada tipo do corpo de prova.



Fonte: O autor.

Nota-se, a partir dos resultados da Tabela 3.6, que no caso dos corpos de prova impressos cortados no estado fresco (IMP-CF), os CPs com direção de impressão transversal (T), apresentaram uma resistência ao cisalhamento 17% inferior à resistência dos CPs com direção de impressão longitudinal (L). No caso dos corpos de prova impressos cortados no estado endurecido (IMP-CE), os CPs com direção de impressão transversal (T) apresentaram uma resistência ao cisalhamento 1% inferior à resistência dos CPs com direção de impressão longitudinal (L). Em relação ao tipo de corte, os CPs cortados no estado fresco apresentaram resistência ao cisalhamento, praticamente, idênticas aqueles cortados no estado endurecido. Comparando-se os corpos de prova impressos aos moldados, observa-se que os corpos de prova impressos, cortados no estado fresco (IMP-CF) ou no estado endurecido (IMP-CE), apresentaram resistência ao cisalhamento, em média, 13% inferior à resistência dos corpos de

prova moldados. Quanto à massa específica, observa-se que houve uma variação de apenas $\pm 2,8\%$ em torno da média.

3.3.4 Ensaios de aderência entre camadas

Apresentam-se, na Tabela 3.7, os resultados dos ensaios de aderência entre camadas (AEC) realizados nos corpos de prova impressos (IMP), cortados no estado fresco (CF) e no estado endurecido (CE). Os resultados individuais estão no apêndice B Na Tabela B.4. Em todos os corpos de prova a ruptura ocorreu na argamassa, conforme mostrado na Figura 3.11. Em quatro dos seis corpos de prova cortados no estado fresco, apesar de a ruptura ter se dado próxima à interface com as chapas, o plano de ruptura permaneceu dentro do corpo de prova (Figura 3.11a).

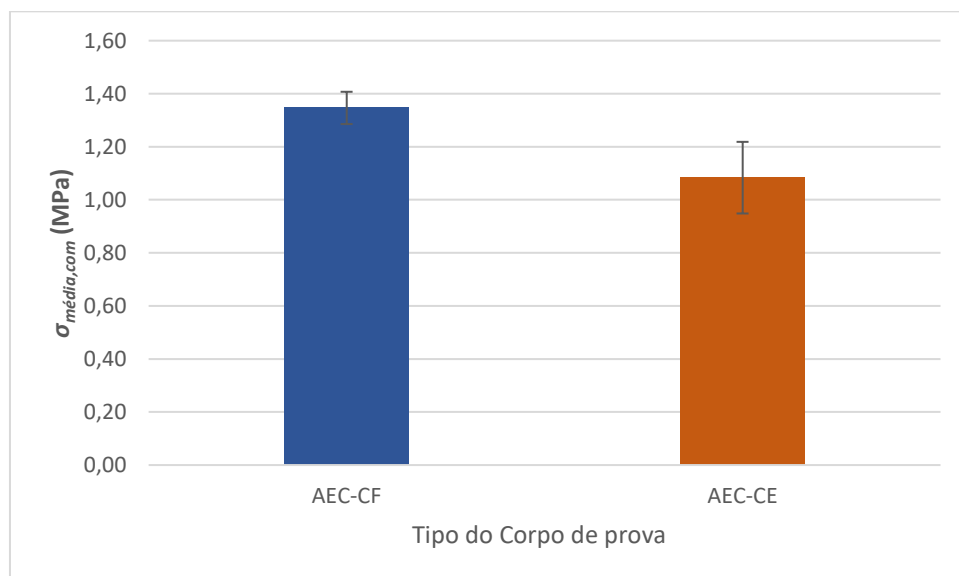
Tabela 3.7 – Resultados dos ensaios de aderência entre camadas.

ID	L_{med} (mm)	b_{med} (mm)	h_{med} (mm)	Massa esp. (kgf/m ³)	$F_{méd,comp}$ (kgf)	$\sigma_{média,com}$ (MPa)	Desv. pad. (MPa)	CV (%)
AEC-IMP-CF	52,16	50,57	31,22	1862,47	3548,87	1,35	6,08%	4,52
AEC-IMP-CE	51,41	51,30	33,35	1881,83	2851,37	1,08	13,50%	12,46

Fonte: O autor.

Na Figura 3.10 o gráfico-resumo das diferenças de tensões entre os modelos de corpos de prova.

Figura 3.10 – Gráfico das tensões de tração do arrancamento de camada de cada tipo do corpo de prova.



Fonte: O autor.

Figura 3.11 – Corpos de prova após a ruptura no ensaio de aderência entre camadas.
(a) Corte no estado fresco; (b) corte no estado endurecido.



Fonte: O autor.

Nota-se, a partir dos resultados da Tabela 3.7, que os corpos de prova impressos cortados no estado fresco (AEC-IMP-CF) apresentaram resistência de aderência entre camadas 24% superior à resistência daqueles cortados no estado endurecido (AEC-IMP-CE). Quanto à massa específica, observa-se que houve uma diferença de 1% entre os valores obtidos.

3.3.5 Comparação entre corpos de prova

Na Tabela 3.8 é apresentada uma comparação dos resultados obtidos em todos os ensaios mecânicos que foram realizados ao longo deste estudo. Foram feitas comparações entre os corpos de prova impressos e moldados, entre os tipos de corte (nos estados fresco e endurecido) e entre as direções de impressão (longitudinal e transversal).

É possível realizar duas comparações iniciais entre os corpos de prova impressos e moldados, avaliando a diferença na massa específica e na resistência mecânica. Em relação à massa específica, observa-se uma baixa variação, com a maior diferença sendo de aproximadamente 2,3% para os CPs CIS-IMP-CE-L em comparação aos CPs CIS-MOL. Isso evidencia que o processo de impressão 3D não afeta a homogeneidade da argamassa, independentemente do tipo de corte e da direção de impressão. Na análise das resistências mecânicas, nota-se uma perda de resistência entre os corpos de prova impressos em comparação aos moldados, com praticamente todos os modelos ensaiados apresentando valores inferiores de resistência. As resistências dos CPs impressos foram até 25% inferiores às dos moldados, conforme demonstrado pelo caso dos CPs FLE-IMP-CF-T. Quanto ao tipo de corte, em geral, os CPs cortados nos estados fresco e endurecido apresentaram, respectivamente, resistências 17,5% e 10% inferiores às dos moldados. Portanto, mesmo que o processo de corte endurecido

seja moroso, os corpos de prova obtidos a partir deste processo apresentaram, em média, resistências mais próximas às dos corpos de prova moldados.

Comparando os dados dos corpos de prova cortados no estado fresco com aqueles cortados no estado endurecido, nota-se que os primeiros apresentaram, de maneira geral, menor resistência na maioria dos casos investigados. As exceções foram observadas nos ensaios de cisalhamento com CPs com direção de impressão longitudinal e de aderência entre camadas.

Por fim, para os ensaios de tração na flexão e cisalhamento, foram produzidos corpos de prova impressos com diferentes direções de impressão. Observou-se que as amostras com cordões longitudinais apresentaram, em média, uma resistência 11,9% maior do que aqueles com cordões transversais, evidenciando que a direção transversal favorece o aparecimento de fissuras, tornando estes corpos de prova menos resistentes.

Tabela 3.8 – Comparação-Resumo entre corpos de prova.

Ensaio	Corpo de prova	Imp. / Mol.	Imp. / Mol.	CF/CE	Média
		ρ (%)	σ_{\max} OU τ_{\max} (%)	σ_{\max} OU τ_{\max} (%)	Long. / Trans. (%)
Compressão	COM-IMP-CF	0,22	-16,32	-9,88	-
	COM-IMP-CE	0,95	-7,14		-
Tração na flexão	FLE-IMP-CF-L	-1,54	-19,61	-21,63	13,62
	FLE-IMP-CE-L	-0,65	2,57		
	FLE-IMP-CF-T	-2,31	-25,32		
	FLE-IMP-CE-T	-0,30	-13,65		
Cisalhamento	CIS-IMP-CF-L	-1,57	-4,97	9,22	10,15
	CIS-IMP-CE-L	-2,32	-12,99		
	CIS-IMP-CF-T	-1,86	-21,31		
	CIS-IMP-CE-T	-1,74	-13,43		
Aderência	AEC-CF	-	-	24,27	-
	AEC-CE	-	-		-

Fonte: O autor.

3.4 Conclusões

Neste trabalho foi apresentada uma análise comparativa da resistência mecânica entre corpos de prova impressos diretamente e aqueles moldados por golpes a partir de ensaios mecânicos de compressão, tração na flexão, cisalhamento e aderência entre camadas. No caso dos corpos de prova impressos, a influência do método de corte na resistência mecânica da argamassa impressa em 3D também foi avaliada considerando dois tipos de cortes: em estado fresco e em estado endurecido, assim como a direção de impressão: transversal e longitudinal.

A partir dos resultados obtidos, notou-se que o comportamento mecânico da argamassa para impressão 3D se mostrou dependente de diversos fatores, entre eles a direção de impressão, o método de corte e o esforço solicitante.

Observou-se que os corpos de prova moldados apresentaram resistências superiores aos corpos de prova impressos. Esta perda de resistência se dá pela modificação das propriedades intrínsecas da argamassa e pela propriedade anisotrópica ou ortotrópica do material causada principalmente pela ausência de fusão das camadas (Kruger; van Zijl, 2021). Em função disso, as metodologias convencionais de controle tecnológico das argamassas, que não consideram as modificações das propriedades intrínsecas do material devido ao processo de impressão, são inadequadas, indicando a necessidade de um fator de segurança redutor de resistência para o cálculo estrutural de estruturas impressas. De acordo com os resultados obtidos neste estudo, esse fator de segurança pode variar de acordo com o tipo de esforço solicitante. Recomenda-se uma redução média de 25% na resistência de argamassas impressas em 3D. Esse valor corrobora a ordem de grandeza das reduções observadas nas pesquisas de Le *et al.* (2012), Van Der Putten *et al.* (2019) e Hou *et al.* (2023)

Este estudo demonstrou ter boa relação entre os sentidos de direção e os corpos de prova moldados, a fim de mitigar o efeito de junta frias levantado por Kruger e Van Zijl (2021), obtendo menores perdas de resistência entre os corpos de prova moldados e impressos. Deixou claro também, que o sentido da impressão é crucial para alguns ensaios, como o ensaio de cisalhamento e ensaio de flexão, de forma que a união dos cordões é fator determinante para esta correlação de perda de capacidade resistiva.

Para o estudo realizado, o sentido de direção, quando ensaiado à flexão ou ao cisalhamento, pode prejudicar em até 14% a resistência mecânica dos corpos de prova impressos quando comparado com o processo moldado, redução inferior em comparação ao encontrado por Wolfs, Bos e Salet (2019), que obtiveram uma redução de aproximadamente 23%.

Neste estudo ficou evidente que o processo de corte influencia na perda de resistência mecânica, em que a maioria dos corpos de prova apresentaram enfraquecimento quando cortados no estado fresco, sendo destacado os corpos de prova de aderência entre camadas, que apresentaram comportamento contrário, ganhando resistência no corte fresco. Especula-se que, para o corpo de prova nestas dimensões de 5x5 cm, o processo de corte fresco acarretou em uma compactação localizada, dificultando o destacamento entre camadas.

3.5 Referências

ALAMI, A. H. *et al.* 3D Concrete Printing: Recent Progress, Applications, Challenges, and Role in Achieving Sustainable Development Goals. **Buildings**, [s. l.], v. 13, n. 4, p. 924, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2075-5309/13/4/924>. Acesso em: 21 maio 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13279:2005, : Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à compressão, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16605, : Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da massa específica, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16916:2021, : Agregado miúdo - Determinação da densidade e da absorção de água, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5738:2015, : Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM248, : Agregados - Determinação da composição granulométrica, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM45, : Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR16372, : NBR 16372: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine), 2015.

BAYRAK, A. T. *et al.* Spatial variation of physical, mechanical, and thermophysical properties of 3D printed concrete across a full-scale wall. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 431, p. 136574, 2024. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S095006182401715X>. Acesso em: 27 jun. 2024.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. BS EN 12390-1:2012, : Testing hardened concrete. Part 1: Shape, dimensions and other requirements for specimens and moulds. **London: BSI**, [s. l.], 2012. p. 15.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. BS EN 12390-3:2019., : Testing hardened concrete. Part 3: Compressive strength of test specimens. **London: BSI**, [s. l.], 2019. p. 20.

BUSWELL, R. A. *et al.* 3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 112, p. 37–49, 2018.

CHRISTEN, H.; VAN ZIJL, G.; DE VILLIERS, W. The incorporation of recycled brick aggregate in 3D printed concrete. **Cleaner Materials**, [s. l.], v. 4, 2022.

HACK, N. *et al.* Structural stay-in-place formwork for robotic in situ fabrication of non-standard concrete structures: A real scale architectural demonstrator. **Automation in Construction**, [s. l.], v. 115, p. 103197, 2020.

HOU, S. *et al.* Mechanical properties and pore structure of 3D printed mortar with recycled powder. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 394, p. 132068, 2023.

Jl, G. *et al.* A 3D Printed Ready-Mixed Concrete Power Distribution Substation: Materials and Construction Technology. **Materials**, [s. l.], v. 12, n. 9, p. 1540, 2019. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1944/12/9/1540>. Acesso em: 21 jun. 2024.

JOH, C. *et al.* Buildability and Mechanical Properties of 3D Printed Concrete. **Materials**, [s. l.], v. 13, n. 21, p. 4919, 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1944/13/21/4919>. Acesso em: 24 jun. 2024.

KAZEMIAN, A. *et al.* Cementitious materials for construction-scale 3D printing: Laboratory testing of fresh printing mixture. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 145, p. 639–647, 2017.

KLOFT, H. *et al.* Reinforcement strategies for 3D-concrete-printing. **Civil Engineering Design**, [s. l.], v. 2, n. 4, p. 131–139, 2020. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/cend.202000022>. Acesso em: 11 jun. 2023.

KRUGER, J.; VAN ZIJL, G. A compendious review on lack-of-fusion in digital concrete fabrication. **Additive Manufacturing**, [s. l.], v. 37, p. 101654, 2021.

LE, T. T. *et al.* Hardened properties of high-performance printing concrete. **Cement and Concrete Research**, Department of Civil and Building Engineering, Loughborough University, Loughborough, Leicestershire, LE11 3TU, United Kingdom, v. 42, n. 3, p. 558–566, 2012. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84858076586&doi=10.1016%2Fj.cemconres.2011.12.003&partnerID=40&md5=97c3b44cd46977a08b6f160d2574c7ff>. Acesso em: 10 nov. 2023.

LE, T. T. *et al.* Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete.

Materials and Structures/Materiaux et Constructions, [s. l.], v. 45, n. 8, p. 1221–1232, 2012. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1617/s11527-012-9828-z>. Acesso em: 26 maio 2023.

LEE, H. *et al.* Evaluation of the Mechanical Properties of a 3D-Printed Mortar. ST ALBAN-ANLAGE 66, CH-4052 BASEL, SWITZERLAND, v. 12, n. 24, p. 4104, 2019. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1944/12/24/4104>. Acesso em: 21 jun. 2024.

LICCIARDELLO, L. *et al.* Investigation of the Interlayer Strength of 3D Printed Concrete Shear Walls. *In:* , 2022. **fib Symposium**. [S. l.: s. n.], 2022. p. 817–823.

LUCEN, H. *et al.* The synergistic effect of greenhouse gas CO₂ and silica fume on the properties of 3D printed mortar. **Composites Part B: Engineering**, [s. l.], v. 271, p. 111188, 2024.

MA, G.; LI, Z.; WANG, L. Printable properties of cementitious material containing copper tailings for extrusion based 3D printing. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 162, p. 613–627, 2018.

MEURER, M.; CLASSEN, M. Mechanical Properties of Hardened 3D Printed Concretes and Mortars—Development of a Consistent Experimental Characterization Strategy. **Materials**, [s. l.], v. 14, n. 4, p. 752, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1944/14/4/752>. Acesso em: 1 jul. 2024.

NERELLA, V. N.; HEMPEL, S.; MECHTCHERINE, V. Effects of layer-interface properties on mechanical performance of concrete elements produced by extrusion-based 3D-printing. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 205, p. 586–601, 2019.

PADILHA, V. Z. Avaliação das propriedades mecânicas de elementos de concreto produzidos por impressão 3D. [s. l.], 2020. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/216463>. Acesso em: 3 jun. 2023.

REHMAN, A. U.; KIM, J.-H. 3D Concrete Printing: A Systematic Review of Rheology, Mix Designs, Mechanical, Microstructural, and Durability Characteristics. **Materials 2021, Vol. 14, Page 3800**, [s. l.], v. 14, n. 14, p. 3800, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1180346>. Acesso em: 10 jul. 2024.

ROBAYO-SALAZAR, R. *et al.* 3D printing with cementitious materials: Challenges and opportunities for the construction sector. **Automation in Construction**, [s. l.], v. 146, p.

104693, 2023.

RUBIN, A. P. **Influência da taxa de estruturação nas propriedades reológicas, físicas e mecânicas de concretos para impressão 3D (3DCP)**. 2021. 266 f. - UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA, [s. l.], 2021. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/227270>.

SALET, T. A. M. *et al.* Design of a 3D printed concrete bridge by testing*. **Virtual and Physical Prototyping**, [s. l.], v. 13, n. 3, p. 222–236, 2018.

SUN, S.; BRANDT, M.; EASTON, M. Powder bed fusion processes: An overview. **Laser Additive Manufacturing: Materials, Design, Technologies, and Applications**, [s. l.], p. 55–77, 2017.

UNI EN 1052-3, : Method of test masonry – Part 3: Determination of the initial shear strength. **European Committee for Standardization (CEN)**, [s. l.], 2002.

VAN DER PUTTEN, J. *et al.* Microstructural Characterization of 3D Printed Cementitious Materials. **Materials**, [s. l.], v. 12, n. 18, p. 2993, 2019. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1944/12/18/2993>. Acesso em: 25 jul. 2024.

WOLFS, R. J. M.; BOS, F. P.; SALET, T. A. M. Hardened properties of 3D printed concrete: The influence of process parameters on interlayer adhesion. **CEMENT AND CONCRETE RESEARCH**, THE BOULEVARD, LANGFORD LANE, KIDLINGTON, OXFORD OX5 1GB, ENGLAND, v. 119, p. 132–140, 2019.

ZOU, S. *et al.* On rheology of mortar with recycled fine aggregate for 3D printing. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 311, p. 125312, 2021.

CAPÍTULO 4: CONCLUSÕES GERAIS

Este trabalho teve como primeiro objetivo avaliar a construtibilidade e a printabilidade de diferentes traços, definindo um traço ótimo e, com este, realizar ensaios de caracterização mecânica.

Os traços que avaliavam as influências dos materiais secos foram definidos através de variações de materiais, como areia, filler e a relação água/finos, houve também o estudo da influência de três aditivos: incorporador de ar, modificador de consistência e retardador de pega. A construtibilidade foi avaliada contando quantas camadas foi possível empilhar antes do momento do colapso e a printabilidade foi avaliada através de parâmetros pré-estabelecidos, nomeada de HRAP, que engloba a análise da Homogeneidade, Rugosidade e Abatimento da camada de base e Precisão de forma.

Foi possível notar que a relação água/finos afeta diretamente a printabilidade e a construtibilidade, assim como a areia, de forma que no primeiro caso aumentar a quantidade de água reduz a construtibilidade enquanto para a areia o fenômeno ocorre de forma contrária. Nas porcentagens testadas, a variação do *filler* não apresentou alterações significativas no comportamento da argamassa quanto a construtibilidade e a printabilidade.

Ao final da primeira etapa, ao analisar os resultados de influência dos aditivos, percebeu-se que para o traço estudado o aditivo retardador de pega é dispensável e não contribuiu para aprimorar a construtibilidade ou a printabilidade. Em contra partida, os outros dois aditivos (incorporador de ar e modificador de consistência) melhoraram estes parâmetros de impressão.

Em paralelo a obtenção dos dados de tensão de cisalhamento máxima, obtida por meio de testes no reômetro, se mostrou eficaz para estimar a construtibilidade de argamassas, obtendo uma boa correspondência estatística. Atualmente a limitação da construtibilidade da impressora do Laboratório de Estruturas da UFV está no sistema de extrusão da impressora que não possui torque suficiente para extrudar argamassas com maiores tensões de cisalhamento.

Na segunda parte deste trabalho foram avaliadas as propriedades mecânicas da argamassa do traço ótimo, no qual foram avaliadas as tensões de compressão, tração na flexão, cisalhamento e de aderência entre camadas para os corpos de prova impressos e moldados e cortados no estado fresco e no estado endurecido.

Para os corpos de prova do ensaio de compressão houve uma redução de 16,3% e 7,1% na resistência à compressão dos corpos de prova cortados no estado fresco e endurecido, respectivamente, ao serem comparados com os corpos de prova moldados.

Nos corpos de prova prismáticos, destinados à tração na flexão e cisalhamento, observou-se diferenças maiores do que os corpos de prova ensaiados à compressão, de forma que, à flexão, apresentaram perdas de até 25% em relação aos moldados enquanto no cisalhamento ficou na faixa de 21% de redução para a mesma comparação. De forma geral, considerar uma redução de 25% para as resistências de corpos de prova impressos vai de encontro aos resultados encontrados em outras pesquisas.

O tipo de corte para conformação do corpo de prova apresentou redução em praticamente todos os corpos de prova, indicando que há alterações significativas nas resistências que devam ser estudadas de formas mais minuciosas. Por fim, como esperado, o sentido de impressão apresentou diferença de resistência mecânica, tal que os corpos de prova com cordões em sentido transversal apresentaram menores resistências quanto à tração na flexão e ao cisalhamento.

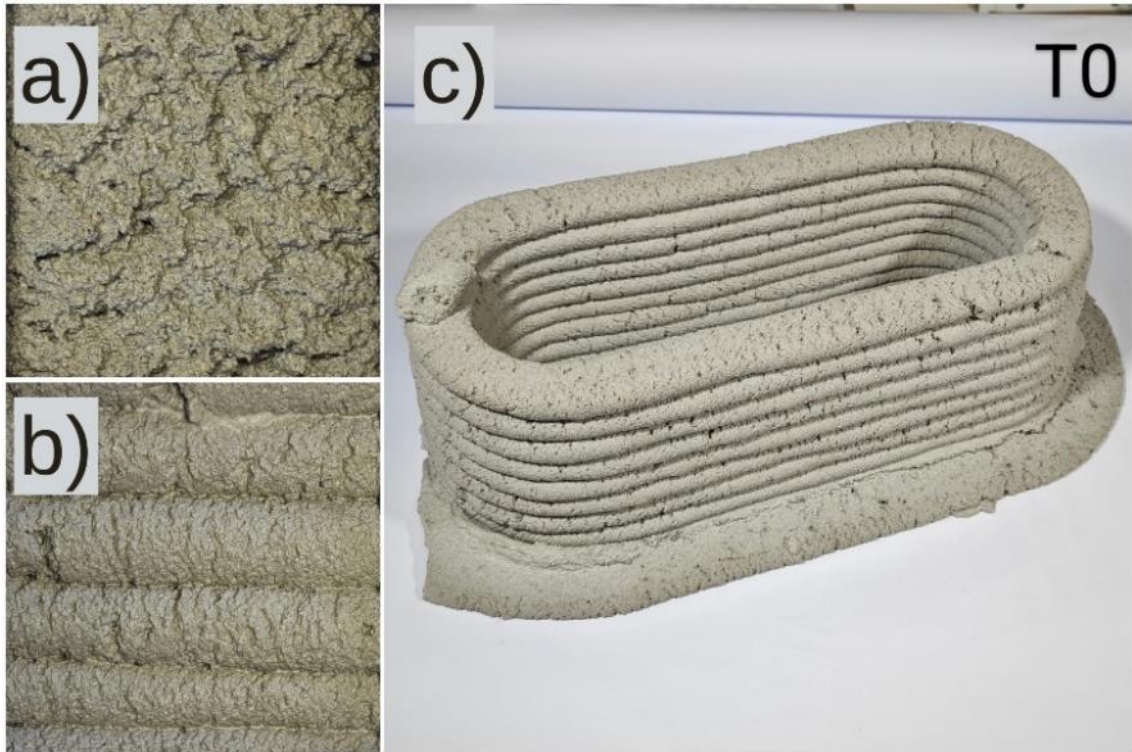
4.1 Sugestões para trabalhos futuros

Dados os resultados obtidos neste estudo, é sugerido o aprofundamento de estudos a seguir:

- Dado a argamassa de traço ótimo, variar a relação de água/finos de maneira sutil a fim de aprimorar a construtibilidade;
- Realizar um estudo comparativo de traços ajustando a relação água/finos para que todos os traços apresentem a mesma tensão de cisalhamento máxima, eliminando o efeito da alteração de consistência na construtibilidade e printabilidade;
- Avaliar a influência da abertura do bico de impressão na construtibilidade;
- Investigar o que acarreta na perda de resistência dos cortes no estado fresco;
- Estudar o corpo de prova de arrancamento de camada de tamanhos maiores, para mitigar o efeito de junção das bordas cortadas, inserindo um entalhe para facilitar a ruptura.

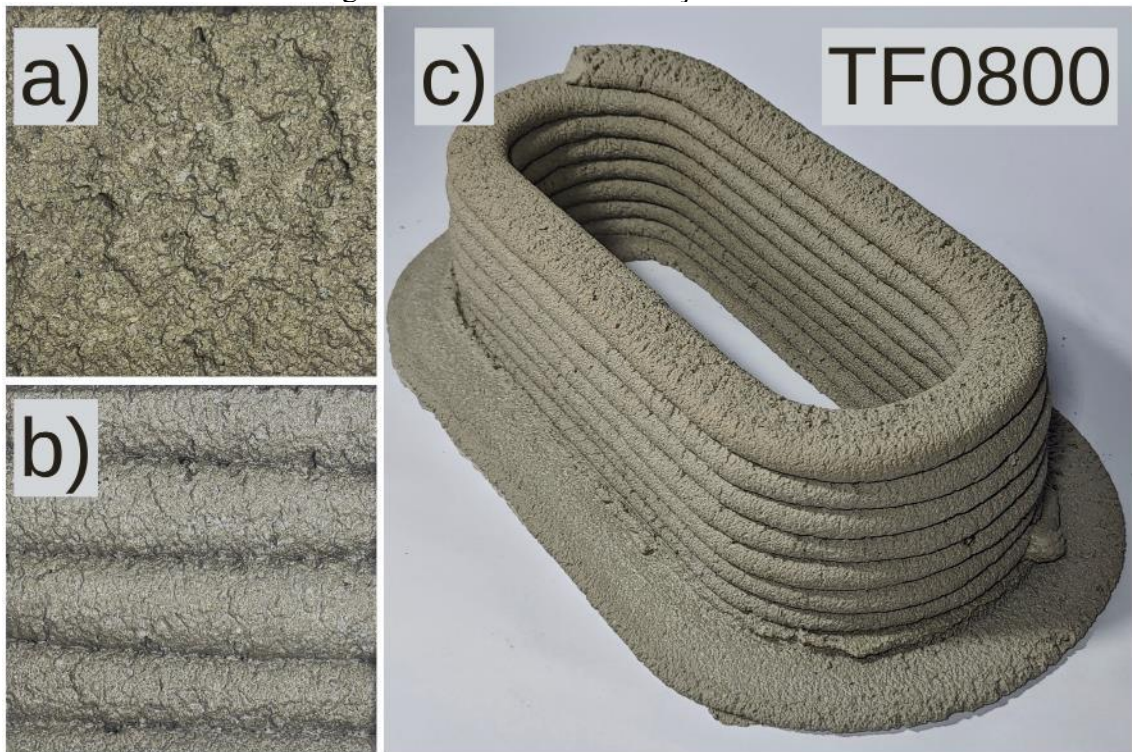
APÊNDICE A: DETALHES DOS CORPOS DE PROVA IMPRESSOS

Figura A.1- Detalhes do Traço T0.



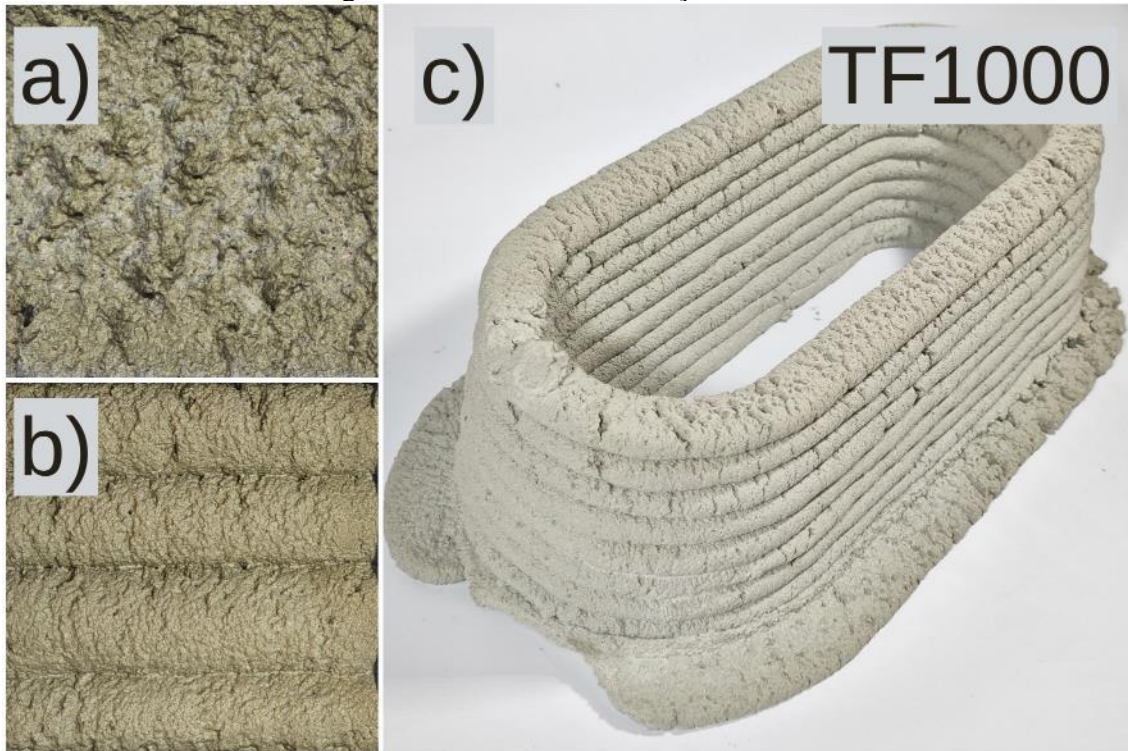
Fonte: O autor.

Figura A.2- Detalhes do Traço TF0800.



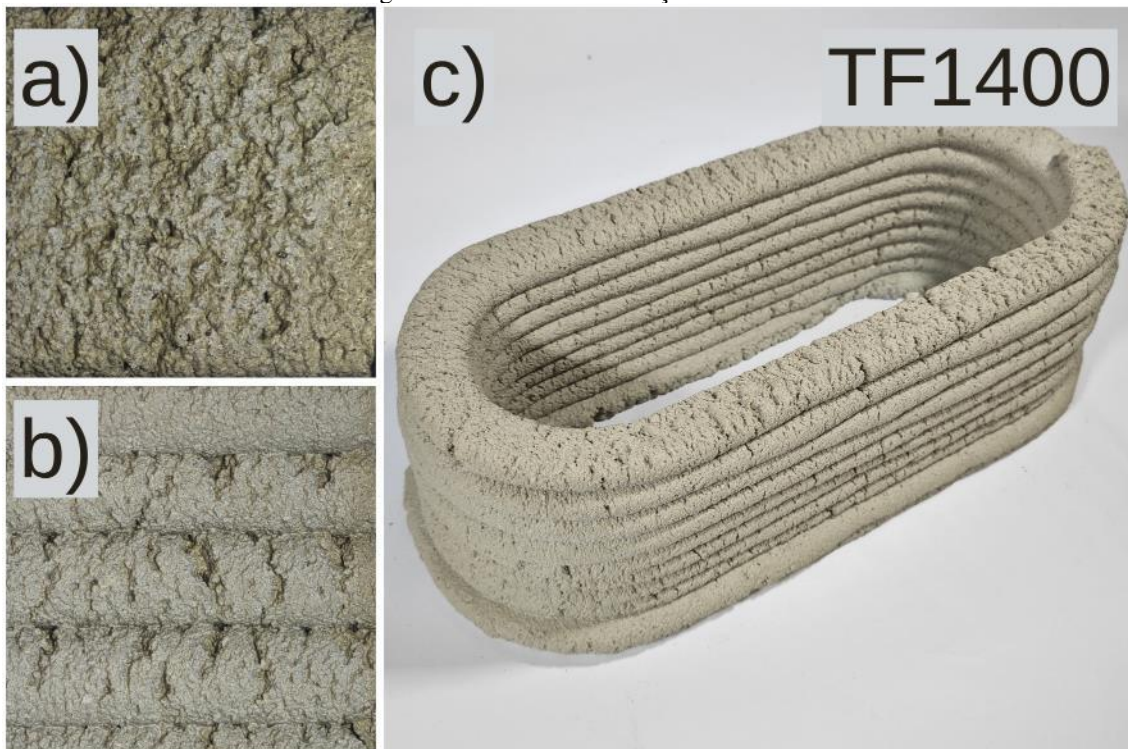
Fonte: O autor.

Figura A.3- Detalhes do Traço TF1000.



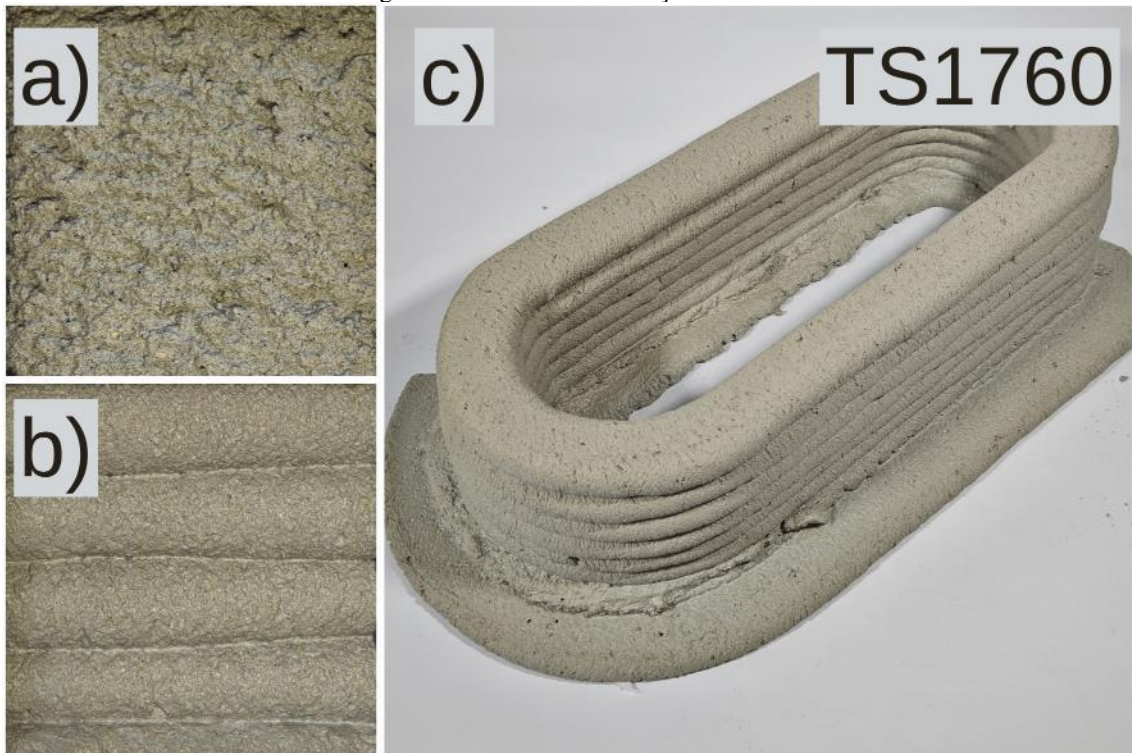
Fonte: O autor.

Figura A.4- Detalhes do Traço TF1400.



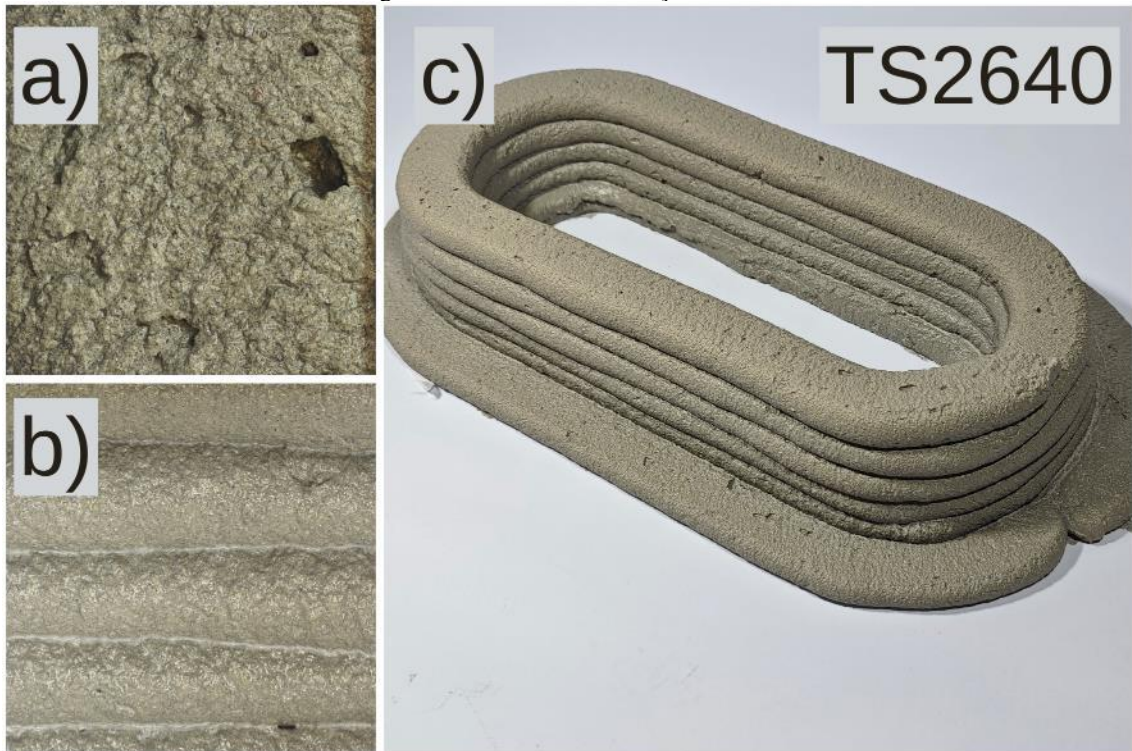
Fonte: O autor.

Figura A.5- Detalhes do Traço TS1760.



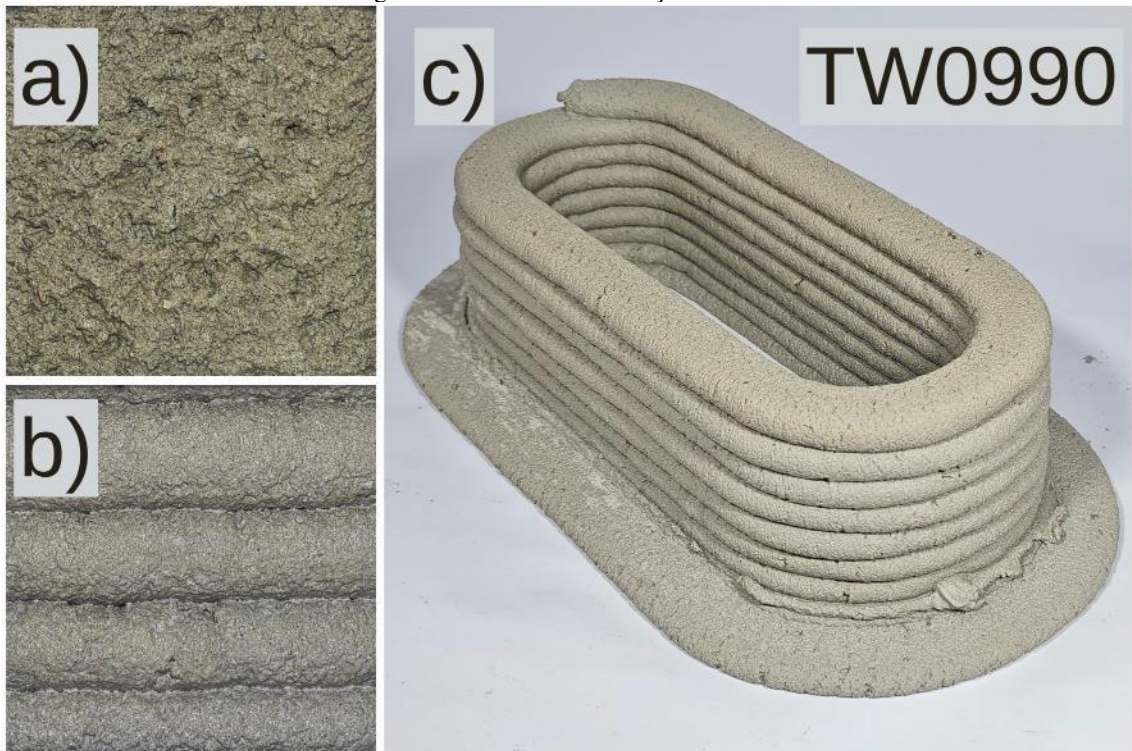
Fonte: O autor.

Figura A.6- Detalhes do Traço TS2640.



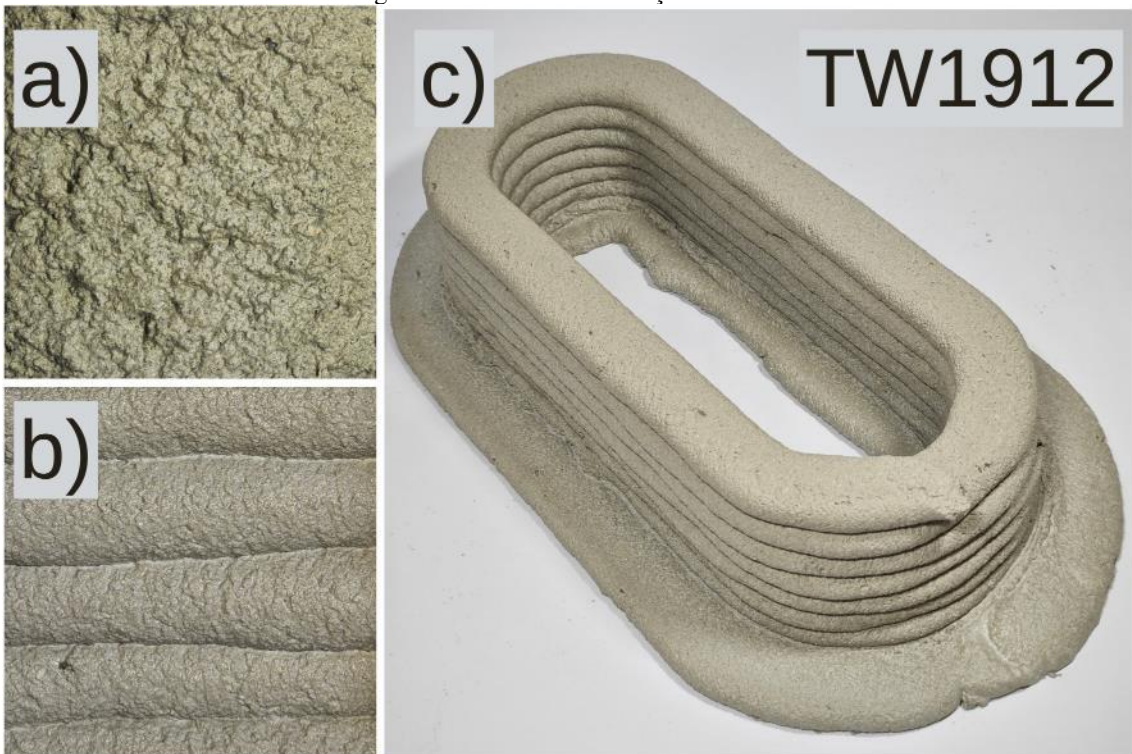
Fonte: O autor.

Figura A.7- Detalhes do Traço TW0990.



Fonte: O autor.

Figura A.8- Detalhes do Traço TW1912.



Fonte: O autor.

Figura A.9- Detalhes do Traço TS1760-1,5-0-0.



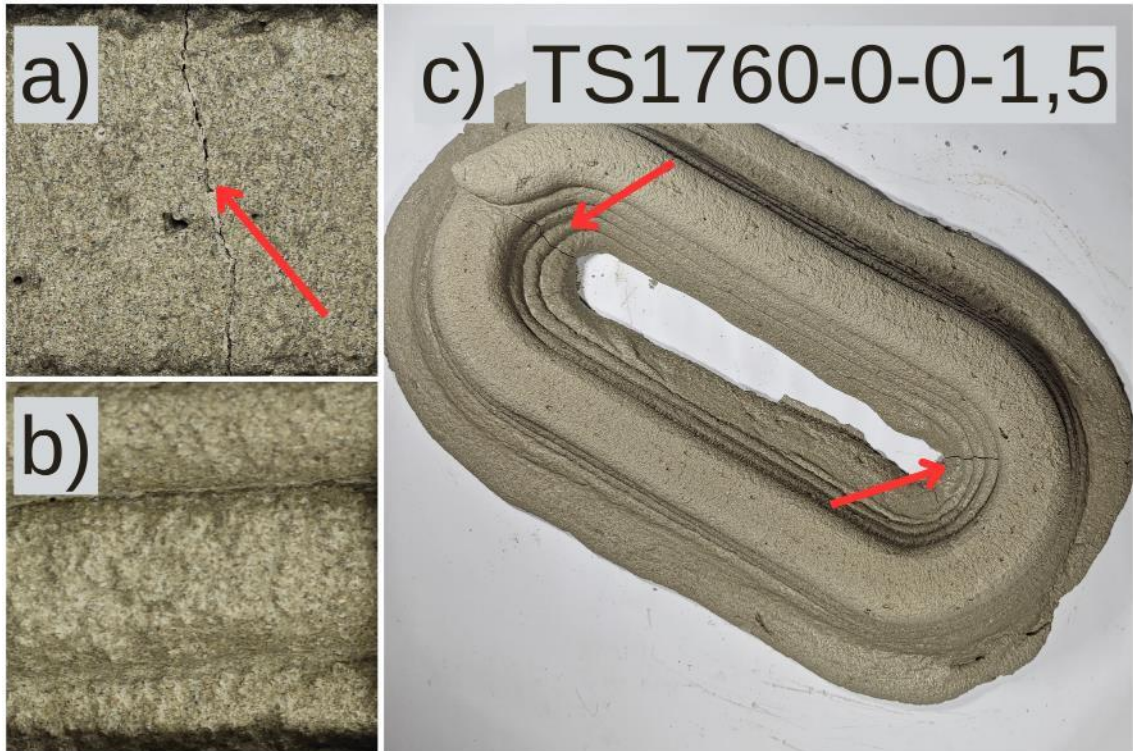
Fonte: O autor.

Figura A.10- Detalhes do Traço TS1760-0-0,5-0.



Fonte: O autor.

Figura A.11- Detalhes do Traço TS1760-0-0-1,5.



Fonte: O autor.

Figura A.12- Detalhes do Traço TS1760-0,75-0,25-0.



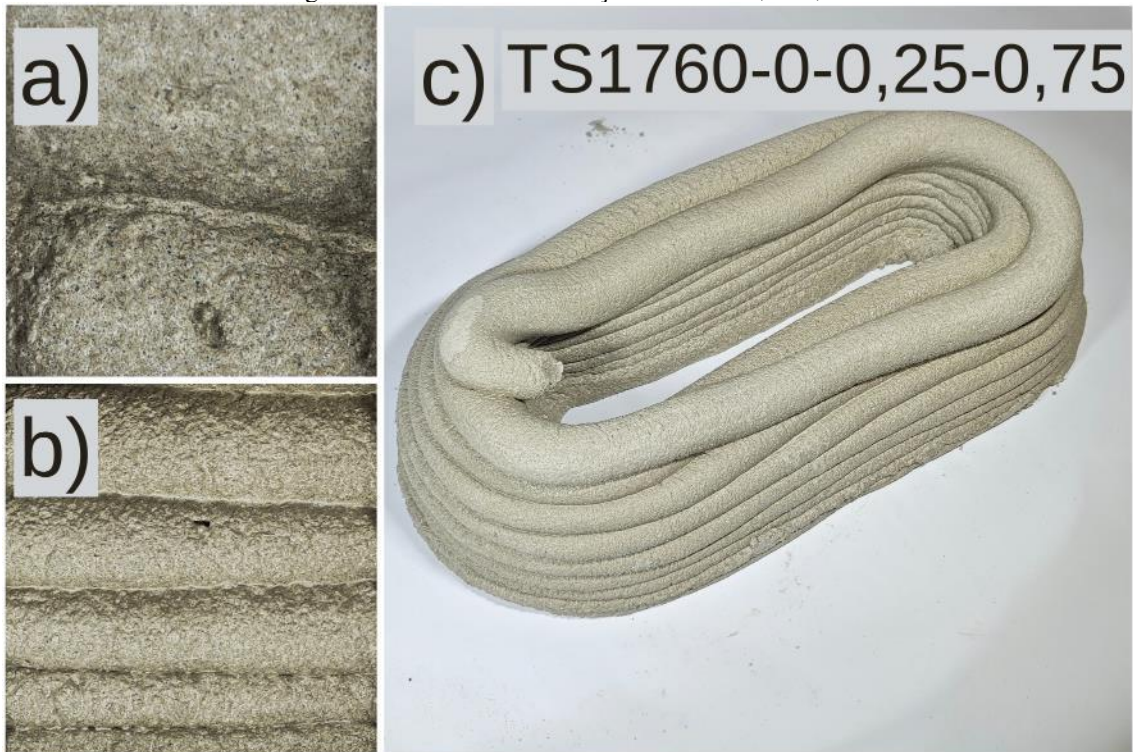
Fonte: O autor.

Figura A.13- Detalhes do Traço TS1760-0,75-0-0,75.



Fonte: O autor.

Figura A.14- Detalhes do Traço TS1760-0-0,25-0,75.



Fonte: O autor.

Figura A.15- Detalhes do Traço TS1760-0,5-0,17-0,5.



Fonte: O autor.

Figura A.16- Detalhes do Traço TS1760-1-0,08-0,25.



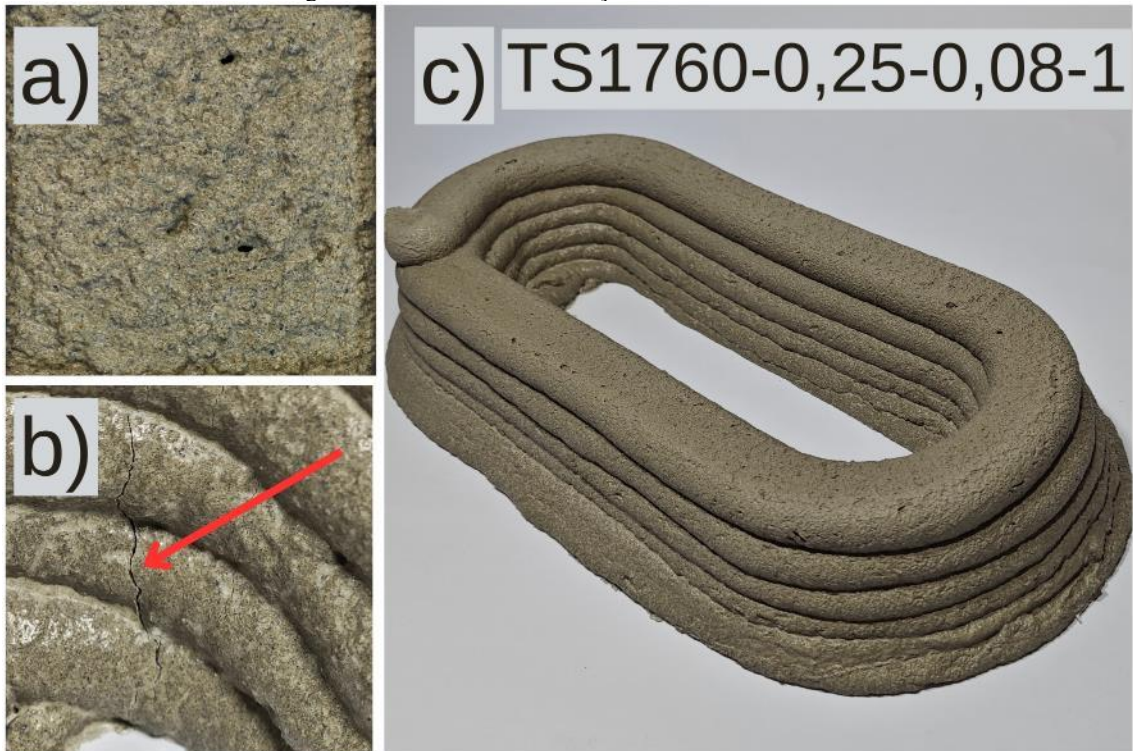
Fonte: O autor.

Figura A.17- Detalhes do Traço TS1760-0,25-0,33-0,25.



Fonte: O autor.

Figura A.18- Detalhes do Traço TS1760-0,25-0,08-1.



Fonte: O autor.

APÊNDICE B: RESULTADOS DOS ENSAIOS MECÂNICOS NOS CORPOS DE PROVA

Tabela B.1- Dados dos corpos de prova impressos e moldados de dimensões 10x10x10cm – ensaio de compressão uniaxial.

ID	L ₁ (mm)	L ₂ (mm)	L ₃ (mm)	L ₄ (mm)	L _{med} (mm)	b ₁ (mm)	b ₂ (mm)	b ₃ (mm)	b ₄ (mm)	b _{med} (mm)	h ₁ (mm)	h ₂ (mm)	h ₃ (mm)	h ₄ (mm)	h _{med} (mm)	Densidade (kgf/m ³)	A (mm ²)	F _{máx} (kgf)	σ _{max} (MPa)
COM-IMP-CF-1	103,5	101,2	102,2	100,3	101,8	100,9	100,6	101,7	101,4	101,2	100,3	100,2	100,7	100,6	100,4	1903,50	10293,28	16010,00	15,26
COM-IMP-CF-2	101,1	101,5	101,8	101,8	101,6	99,6	99,9	99,3	99,4	99,5	100,0	98,9	98,8	99,5	99,3	1909,7	10107,0	15984,1	15,5
COM-IMP-CF-3	100,8	99,6	99,5	99,1	99,7	99,9	100,8	100,3	100,0	100,3	103,4	103,9	102,5	102,1	103,0	1911,6	9998,7	16476,1	16,2
COM-IMP-CF-4	100,6	99,9	99,0	100,2	99,9	103,0	100,7	100,8	103,1	101,9	104,6	105,1	104,5	104,4	104,6	1903,9	10179,3	14763,0	14,2
COM-IMP-CF-5	94,8	99,0	95,9	100,7	97,6	99,9	98,1	99,3	100,8	99,5	105,1	104,9	104,6	104,6	104,8	1912,9	9716,6	13894,5	14,0
COM-IMP-CF-6	102,5	102,2	102,1	102,4	102,3	101,8	100,0	100,5	102,0	101,1	101,7	100,6	100,6	101,2	101,0	1911,9	10335,1	14386,5	13,7
COM-IMP-CE-1	99,2	102,3	101,9	98,6	100,5	98,4	97,4	97,1	97,4	97,6	101,5	101,8	102,8	102,4	102,1	1909,2	9806,3	16061,8	16,1
COM-IMP-CE-2	99,5	98,9	98,8	100,2	99,3	98,9	97,2	97,4	99,3	98,2	101,8	102,4	101,7	101,6	101,9	1922,2	9754,7	16731,1	16,8
COM-IMP-CE-3	97,4	98,5	98,2	97,2	97,8	101,1	99,4	99,3	101,1	100,2	102,9	103,4	104,2	103,3	103,4	1919,3	9802,3	17488,1	17,5
COM-IMP-CE-4	97,8	99,5	100,0	98,6	99,0	99,5	98,4	99,7	98,7	99,1	101,7	101,8	102,6	102,4	102,1	1925,5	9806,4	15820,8	15,8
COM-IMP-CE-5	100,6	99,8	100,7	99,9	100,3	100,2	98,5	101,0	99,1	99,7	102,0	102,9	102,8	102,0	102,4	1930,6	9993,9	16647,5	16,3
COM-IMP-CE-6	100,4	97,8	97,5	100,2	99,0	97,6	96,2	98,8	97,4	97,5	100,3	101,8	100,8	100,4	100,8	1930,4	9647,6	15765,0	16,0
COM-MOL-1	101,2	101,8	102,0	100,7	101,4	100,1	99,6	100,1	100,8	100,2	101,6	102,0	101,6	101,5	101,6	1898,3	10158,2	18496,1	17,9
COM-MOL-2	100,9	101,2	101,5	101,3	101,2	101,6	101,2	100,3	100,1	100,8	102,3	102,8	102,2	102,2	102,4	1909,2	10201,2	18450,2	17,7
COM-MOL-3	100,9	101,5	101,6	100,9	101,2	100,9	100,7	101,8	101,8	101,3	103,0	103,0	102,8	102,8	102,9	1911,4	10252,6	18757,0	17,9
COM-MOL-4	101,6	101,9	101,7	101,5	101,7	100,8	100,8	101,6	101,7	101,2	102,8	103,1	103,8	102,8	103,1	1922,1	10292,6	18342,7	17,5
COM-MOL-5	101,4	101,5	101,6	101,4	101,5	100,9	100,6	101,4	101,1	101,0	104,1	105,2	104,4	103,9	104,4	1921,4	10251,5	18356,6	17,6
COM-MOL-6	101,5	102,0	102,0	101,6	101,8	101,0	100,9	101,1	101,2	101,1	101,2	101,6	101,2	101,1	101,3	1866,0	10285,9	18424,4	17,6

Fonte: O autor.

Tabela B.2- Dados dos corpos de prova impressos e moldados de dimensões 4x4x16cm – ensaio de tração na flexão.

ID	L ₁ (mm)	L ₂ (mm)	L ₃ (mm)	L ₄ (mm)	L _{med} (mm)	b ₁ (mm)	b ₂ (mm)	b ₃ (mm)	b ₄ (mm)	b _{med} (mm)	h ₁ (mm)	h ₂ (mm)	h ₃ (mm)	h ₄ (mm)	h _{med} (mm)	Densidade (kgf/m ³)	A (mm ²)	F _{máx} (kgf)	Rf (MPa)
FLE-IMP-CF-1L	160,8	160,6	160,3	160,8	160,6	100,0	40,7	40,4	40,9	40,3	40,6	40,8	41,0	41,1	40,9	1875,5	1658,3	123,8	2,85
FLE-IMP-CF-2L	160,6	161,0	161,2	160,9	160,9	100,0	41,1	41,8	42,0	42,3	41,8	40,8	41,6	41,5	41,4	1842,7	1731,5	123,1	2,83
FLE-IMP-CF-3L	160,3	160,2	160,1	160,8	160,3	100,0	40,7	40,9	40,9	40,6	40,8	41,0	41,3	41,3	41,1	1879,6	1675,8	100,8	2,32
FLE-IMP-CF-4L	161,0	160,0	160,1	160,2	160,3	100,0	40,7	41,2	41,0	41,0	41,0	39,4	39,4	39,0	39,7	1881,1	1626,6	96,7	2,22
FLE-IMP-CF-5L	161,4	160,0	159,9	160,0	160,3	100,0	40,6	41,1	40,8	41,6	41,0	40,9	39,8	40,2	40,5	1883,8	1660,1	93,7	2,15
FLE-IMP-CF-6L	159,1	159,2	159,1	158,6	159,0	100,0	41,0	40,3	41,1	40,5	40,7	41,3	41,1	41,1	41,1	1865,8	1671,8	108,7	2,50
FLE-IMP-CF-1T	162,5	162,8	162,6	161,9	162,5	100,0	40,9	41,4	40,6	40,3	40,8	38,9	39,1	38,5	39,3	1844,9	1602,8	89,8	2,07
FLE-IMP-CF-2T	158,7	158,2	155,7	155,5	157,0	100,0	40,2	40,9	41,7	40,6	40,8	38,6	40,0	40,4	40,0	1868,5	1631,9	88,1	2,02
FLE-IMP-CF-3T	160,9	162,0	161,7	160,5	161,3	100,0	41,5	41,7	41,2	40,8	41,3	41,0	39,8	40,8	40,7	1842,7	1683,4	115,6	2,66
FLE-IMP-CF-4T	160,7	161,0	160,8	160,8	160,8	100,0	42,0	42,2	43,0	42,4	42,4	40,7	40,3	40,4	40,9	1853,0	1735,9	93,2	2,14
FLE-IMP-CF-5T	160,8	161,9	160,6	160,1	160,8	100,0	41,2	41,0	41,7	41,8	41,4	41,0	40,9	40,8	41,0	1849,1	1700,0	105,0	2,42
FLE-IMP-CF-6T	161,4	160,8	160,7	160,4	160,8	100,0	41,1	42,0	41,6	42,0	41,7	40,1	40,7	40,6	40,8	1864,1	1699,4	97,5	2,24
FLE-IMP-CE-1L	160,4	160,4	160,5	160,8	160,5	100,0	39,4	40,1	39,6	40,3	39,8	41,1	41,4	41,4	40,9	1874,6	1630,2	127,8	2,94
FLE-IMP-CE-2L	161,4	161,6	161,8	161,9	161,7	100,0	41,7	41,4	41,7	40,8	41,4	42,2	42,1	42,2	42,0	1876,6	1737,0	183,3	4,21
FLE-IMP-CE-3L	160,1	159,8	159,8	160,2	159,9	100,0	41,6	41,1	41,9	41,5	41,5	40,3	40,2	40,8	40,7	1846,5	1691,6	160,8	3,70
FLE-IMP-CE-4L	162,0	161,7	161,8	162,2	161,9	100,0	38,9	40,1	39,5	40,8	39,8	41,6	41,7	41,6	41,2	1892,8	1639,8	142,4	3,27
FLE-IMP-CE-5L	162,2	162,1	162,0	162,2	162,1	100,0	41,3	40,9	41,1	41,0	41,1	40,0	40,1	40,0	40,3	1901,0	1654,0	136,9	3,15
FLE-IMP-CE-6L	160,7	160,6	160,8	161,1	160,8	100,0	39,2	39,8	39,1	39,7	39,4	40,9	41,0	41,0	40,6	1881,3	1601,4	123,2	2,83
FLE-IMP-CE-1T	161,7	160,9	160,8	161,2	161,1	100,0	42,2	41,7	42,1	42,0	42,0	40,3	41,3	40,4	41,0	1877,1	1720,2	122,7	2,82
FLE-IMP-CE-2T	157,9	157,5	157,6	157,8	157,7	100,0	41,7	41,7	41,7	41,1	41,6	39,8	40,3	40,0	40,4	1901,4	1679,5	134,1	3,08
FLE-IMP-CE-3T	161,9	162,2	161,5	161,3	161,7	100,0	40,6	40,9	40,3	40,7	40,6	40,6	41,2	40,5	40,7	1898,1	1655,8	149,3	3,43
FLE-IMP-CE-4T	161,0	160,7	160,8	161,2	160,9	100,0	43,6	42,4	43,5	42,2	42,9	43,3	43,2	43,0	43,1	1905,6	1851,5	141,5	3,25
FLE-IMP-CE-5T	160,7	160,0	160,1	160,8	160,4	100,0	41,2	41,8	41,7	42,0	41,7	41,4	41,2	41,3	41,4	1909,0	1723,0	108,7	2,50
FLE-IMP-CE-6T	163,3	163,3	163,3	163,2	163,3	100,0	41,1	40,6	41,2	40,2	40,8	38,5	38,9	38,8	39,3	1884,8	1600,8	95,9	2,21
FLE-MOL-1	160,4	160,2	160,3	160,8	160,4	100,0	40,1	41,3	40,5	41,6	40,9	40,8	41,0	40,9	40,9	1913,9	1671,1	129,2	2,97
FLE-MOL-2	160,3	160,6	160,3	160,2	160,3	100,0	40,3	40,5	40,5	40,6	40,5	40,3	40,4	40,5	40,4	1940,4	1634,1	124,6	2,87
FLE-MOL-3	160,2	160,1	160,6	160,6	160,4	100,0	41,0	40,8	40,6	40,0	40,6	40,7	40,6	40,6	40,6	1868,6	1648,4	130,3	2,99
FLE-MOL-4	160,3	160,2	160,3	160,5	160,3	100,0	39,8	41,2	40,1	41,3	40,6	40,6	40,9	40,9	40,7	1921,5	1654,6	130,6	3,00
FLE-MOL-5	160,6	160,4	160,4	160,6	160,5	100,0	40,7	40,7	40,9	41,0	40,8	40,4	40,3	40,1	40,4	1872,0	1648,3	128,5	2,95
FLE-MOL-6	160,6	160,6	160,2	160,4	160,5	100,0	40,2	40,3	40,9	40,7	40,6	40,7	40,8	40,7	40,7	1882,7	1649,1	127,9	2,94

Fonte: O autor.

Tabela B.3- Dados dos corpos de prova impressos e moldados de dimensões 4x4x16cm – ensaio à cisalhamento.

ID	L ₁ (mm)	L ₂ (mm)	L ₃ (mm)	L ₄ (mm)	L _{med} (mm)	b ₁ (mm)	b ₂ (mm)	b ₃ (mm)	b ₄ (mm)	b _{med} (mm)	h ₁ (mm)	h ₂ (mm)	h ₃ (mm)	h ₄ (mm)	h _{med} (mm)	Densidade (kgf/m ³)	A (mm ²)	F _{máx} (kgf)	τ _{cis} (MPa)
CIS-IMP-CF-1L	156,2	156,6	156,6	156,3	156,4	39,8	40,1	41,5	41,5	40,7	42,4	42,3	42,1	42,1	42,2	1903,9	1719,0	1402,4	4,00
CIS-IMP-CF-2L	157,1	157,0	157,1	157,3	157,1	41,0	40,5	40,1	40,1	40,4	41,5	41,5	41,7	41,6	41,5	1910,3	1679,0	1521,9	4,45
CIS-IMP-CF-3L	155,9	155,5	155,3	155,4	155,5	41,1	40,8	40,1	39,9	40,5	41,2	41,1	41,4	41,2	41,2	1911,4	1668,7	1657,4	4,87
CIS-IMP-CF-4L	157,3	157,8	157,7	157,5	157,6	41,2	41,0	40,5	40,2	40,7	42,1	41,9	41,5	41,7	41,8	1914,5	1703,8	1727,1	4,97
CIS-IMP-CF-5L	159,2	159,1	159,6	159,2	159,2	40,4	40,5	40,8	40,8	40,6	38,8	38,3	38,8	38,4	38,6	1900,7	1566,0	1543,8	4,84
CIS-IMP-CF-6L	157,2	157,4	157,0	157,0	157,2	42,2	41,9	40,3	40,6	41,2	42,0	42,1	41,3	41,2	41,7	1881,8	1717,7	1551,8	4,43
CIS-IMP-CF-1T	158,0	157,7	157,5	157,7	157,7	39,8	39,6	40,0	40,0	39,8	39,9	39,8	39,7	39,7	39,8	1880,9	1584,4	1336,7	4,14
CIS-IMP-CF-2T	159,4	159,6	159,6	159,6	159,5	41,5	40,9	42,2	42,4	41,7	41,1	41,5	41,0	41,2	41,2	1911,6	1718,3	1422,3	4,06
CIS-IMP-CF-3T	159,2	160,1	159,6	159,0	159,5	41,3	41,1	41,6	41,2	41,3	42,1	42,2	41,5	41,8	41,9	1898,7	1730,5	1422,3	4,03
CIS-IMP-CF-4T	157,5	157,5	157,3	157,4	157,4	40,8	40,9	42,3	42,0	41,5	41,5	41,5	41,7	41,9	41,7	1881,6	1728,4	1370,5	3,89
CIS-IMP-CF-5T	158,1	157,7	157,9	157,7	157,8	41,5	40,7	41,8	42,0	41,5	41,0	41,1	41,3	41,3	41,2	1907,2	1707,6	1247,0	3,58
CIS-IMP-CF-6T	159,9	160,0	159,9	159,8	159,9	40,3	40,6	40,5	41,1	40,6	40,5	40,4	40,0	39,8	40,2	1909,0	1631,6	1037,9	3,12
CIS-IMP-CE-1L	158,2	158,2	158,6	158,1	158,3	43,5	43,4	43,0	43,0	43,2	41,4	41,7	42,3	42,3	41,9	1890,0	1811,9	1458,2	3,95
CIS-IMP-CE-2L	165,7	165,1	165,0	165,6	165,3	42,9	42,5	42,7	42,7	42,7	40,8	40,9	40,8	40,8	40,8	1901,0	1743,5	1360,6	3,83
CIS-IMP-CE-3L	165,1	164,8	165,1	165,2	165,0	42,7	42,5	42,6	42,7	42,6	42,8	42,5	42,5	42,6	42,6	1836,2	1815,2	1567,7	4,24
CIS-IMP-CE-4L	160,9	160,6	160,6	160,9	160,7	42,2	42,4	41,1	41,4	41,8	41,0	41,0	41,2	41,1	41,1	1907,1	1715,9	1627,5	4,65
CIS-IMP-CE-5L	168,7	168,6	168,8	169,2	168,8	41,9	42,0	41,9	42,1	42,0	41,7	41,3	41,4	41,1	41,4	1903,4	1736,5	1390,4	3,93
CIS-IMP-CE-6L	168,9	168,9	168,8	169,3	169,0	41,4	41,7	41,6	41,6	41,6	40,8	40,6	40,7	40,6	40,7	1897,5	1690,4	1599,6	4,64
CIS-IMP-CE-1T	163,5	163,1	162,7	162,9	163,0	41,9	42,2	41,6	41,5	41,8	42,1	41,9	41,7	42,0	41,9	1884,2	1751,5	1470,1	4,12
CIS-IMP-CE-2T	162,2	162,6	162,4	162,6	162,5	42,0	42,2	41,2	41,6	41,7	41,9	41,9	42,0	41,7	41,9	1895,6	1747,0	1571,7	4,41
CIS-IMP-CE-3T	169,5	168,9	168,7	168,7	169,0	40,3	40,1	40,1	40,0	40,1	37,0	37,1	37,0	36,6	36,9	1912,5	1479,3	1107,6	3,67
CIS-IMP-CE-4T	166,5	165,9	165,5	165,8	165,9	41,9	41,5	42,1	41,9	41,9	39,5	39,5	39,5	39,3	39,4	1897,9	1651,2	1370,5	4,07
CIS-IMP-CE-5T	160,0	160,0	160,0	160,1	160,0	43,1	43,2	43,3	43,1	43,2	40,9	41,0	41,0	41,1	41,0	1914,6	1769,3	1727,1	4,79
CIS-IMP-CE-6T	161,6	161,8	161,7	161,6	161,7	42,2	42,2	41,9	41,6	42,0	39,2	39,2	39,1	39,1	39,1	1897,9	1642,7	1354,6	4,04
CIS-MOL-2	160,0	160,1	160,1	159,8	160,0	40,6	40,8	40,7	40,0	40,5	40,3	40,3	40,6	40,6	40,5	1936,9	1639,1	1627,5	4,87
CIS-MOL-4	160,2	160,2	160,1	160,4	160,3	40,6	41,3	40,5	41,2	40,9	40,6	40,7	40,6	40,6	40,6	1938,5	1661,0	1633,5	4,82
CIS-MOL-6	160,3	160,0	160,2	160,3	160,2	40,1	40,1	40,0	40,3	40,1	40,6	40,6	40,4	40,4	40,5	1921,6	1624,2	1502,0	4,54
CIS-MOL-7	160,6	160,6	160,5	160,5	160,5	39,8	40,0	40,2	40,5	40,1	40,2	40,2	40,2	40,2	40,2	1939,6	1612,2	1729,1	5,26
CIS-MOL-8	160,8	160,9	160,6	160,6	160,7	40,5	40,5	40,4	40,4	40,5	40,3	40,7	40,1	40,3	40,4	1943,8	1632,4	1551,8	4,66
CIS-MOL-9	160,2	160,2	160,1	160,0	160,1	40,2	40,1	40,2	40,3	40,2	40,5	40,5	40,3	40,2	40,4	1924,0	1622,9	1603,6	4,85

Fonte: O autor.

Tabela B.4 - Dados dos corpos de prova impressos 5x5cm – ensaio de arrancamento de camadas.

ID	L₁ (mm)	L₂ (mm)	L₃ (mm)	L₄ (mm)	L_{med} (mm)	b₁ (mm)	b₂ (mm)	b₃ (mm)	b₄ (mm)	b_{med} (mm)	h₁ (mm)	h₂ (mm)	h₃ (mm)	h₄ (mm)	h_{med} (mm)	Densidade (kgf/m³)	A (mm²)	F_{máx} (N)	σ_{máx} (MPa)
AEC-CF-1	53,8	53,5	51,9	51,8	52,7	51,5	51,0	52,1	51,5	51,5	30,5	31,7	31,4	32,4	31,5	1869,9	2717,4	3360,00	1,24
AEC-CF-2	53,0	53,4	51,8	52,1	52,6	52,1	52,5	52,7	53,0	52,6	32,6	32,3	33,2	32,7	32,7	1836,5	2764,0	3828,90	1,39
AEC-CF-3	52,3	51,8	52,8	52,6	52,4	52,7	52,3	51,9	52,2	52,3	29,3	29,1	29,0	28,9	29,1	1859,4	2737,9	3633,50	1,33
AEC-CF-4	52,3	51,8	53,0	52,5	52,4	50,2	50,2	49,7	49,8	50,0	30,6	31,0	31,1	31,2	31,0	1873,4	2618,8	3614,00	1,38
AEC-CF-5	52,9	52,8	53,3	53,2	53,1	48,4	48,6	48,4	48,4	48,5	32,1	32,5	31,7	31,9	32,0	1869,4	2570,8	3457,70	1,34
AEC-CF-6	49,6	49,5	50,1	50,0	49,8	48,4	48,6	48,3	49,1	48,6	30,5	31,0	31,0	31,6	31,0	1866,3	2419,6	3399,10	1,40
AEC-CE-1	52,6	52,7	52,3	52,4	52,5	49,8	49,7	49,7	49,6	49,7	31,6	31,8	32,3	32,0	31,9	1874,2	2607,0	3336,00	1,28
AEC-CE-2	52,4	52,7	53,0	52,4	52,6	52,5	52,1	52,2	52,0	52,2	33,8	33,7	33,8	33,8	33,8	1896,6	2745,8	2383,30	0,87
AEC-CE-3	51,6	51,4	51,5	51,3	51,4	51,3	51,7	52,0	52,2	51,8	34,2	34,4	34,1	33,9	34,2	1890,0	2664,1	2852,10	1,07
AEC-CE-4	50,1	49,9	49,7	49,6	49,8	50,8	50,6	50,3	50,1	50,4	31,8	32,1	32,1	32,6	32,1	1883,2	2511,3	2891,20	1,15
AEC-CE-5	50,7	50,4	50,3	50,1	50,4	51,4	51,2	50,9	50,7	51,1	33,7	34,0	34,1	34,4	34,0	1872,8	2572,5	2793,50	1,09
AEC-CE-6	52,0	51,9	51,5	51,5	51,7	52,6	52,4	53,1	52,8	52,7	34,1	33,7	34,3	34,1	34,0	1874,1	2727,3	2852,10	1,05

Fonte: O autor.