



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO SERTÃO
PERNAMBUCANO
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL
CAMPUS SERRA TALHADA**

GUSTAVO MENEZES BERNARDO

**Manufatura aditiva na construção civil - estudo da aplicação de impressão 3D FDM na
fabricação de moldes para concreto análogos a ABNT NBR 5738**

SERRA TALHADA

2025

GUSTAVO MENEZES BERNARDO

Manufatura aditiva na construção civil - estudo da aplicação de impressão 3D FDM na fabricação de moldes para concreto análogos a ABNT NBR 5738

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Bacharelado em Engenharia Civil do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sertão Pernambucano, campus Serra Talhada, com requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. João Emanuel Ambrósio Gomes.

SERRA TALHADA

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

B519 Bernardo, Gustavo Menezes.

Manufatura aditiva na construção civil - estudo da aplicação de impressão 3D FDM na fabricação de moldes para concreto análogos a ABNT NBR 5738 / Gustavo Menezes Bernardo. - Serra Talhada, 2026.

57 f. : il.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sertão Pernambucano, Campus Serra Talhada, 2026.

Orientação: Prof. Dr. João Emanuel Ambrósio Gomes..

1. Engenharia civil. 2. Prototipagem. 3. Estabilidade dimensional. 4. Parâmetros de impressão. 5. Desempenho mecânico. I. Título.

CDD 624

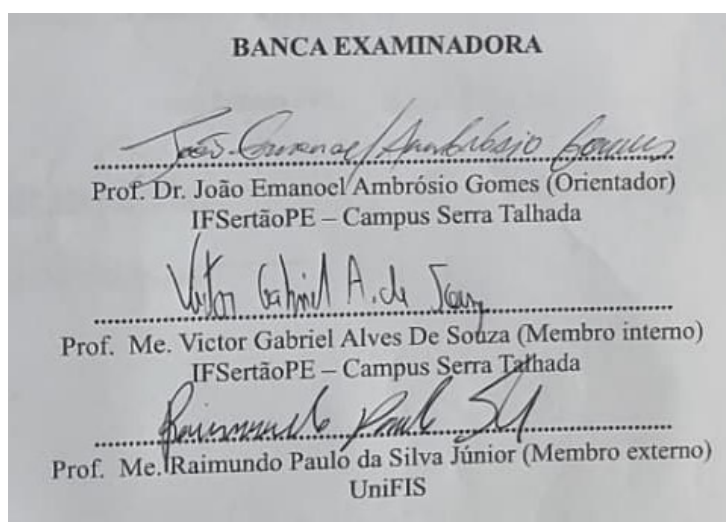
GUSTAVO MENEZES BERNARDO

MANUFATURA ADITIVA NA CONSTRUÇÃO CIVIL: ESTUDO DA APLICAÇÃO DE
IMPRESSÃO 3D FDM NA FABRICAÇÃO DE MOLDES PARA CONCRETO
ANÁLOGOS A ABNT NBR 5738

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Bacharelado em Engenharia Civil do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sertão Pernambucano, campus Serra Talhada, com requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. João Emanuel Ambrósio Gomes.

Aprovado em: 10/12/2025



SERRA TALHADA

2025

Dedico este trabalho à minha mãe, que sempre foi minha maior fonte de força, inspiração e amor. Sua dedicação, coragem e sacrifícios me ensinaram que não existem limites para quem acredita no próprio sonho. Cada conquista alcançada carrega um pouco do seu exemplo e do seu apoio incondicional.

Não reze por uma vida fácil, reze por forças para suportar uma vida difícil.

Bruce Lee

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me conceder força, saúde e discernimento para perseverar em cada etapa desta trajetória acadêmica.

A minha mãe, Aparecida, pelo apoio constante, pelas palavras de incentivo e pela compreensão diante das ausências e dos momentos de dedicação intensa aos estudos. Este trabalho é também fruto do esforço da senhora.

À minha namorada, Danielle, por estar ao meu lado com paciência, cuidado e motivação nos dias mais difíceis, e por acreditar no meu potencial mesmo quando eu duvidava de mim.

Ao meu professor e orientador, João Ambrósio, juntamente com os demais professores que tive durante a graduação, agradeço pela orientação, pelo rigor acadêmico e pela confiança depositada no meu trabalho. Cada ensinamento contribuiu diretamente para a construção do profissional que estou me tornando.

Aos amigos, em especial, Gustavo e Matheus que compartilharam estudos, conversas, desafios e descobertas ao longo desta caminhada, meu sincero agradecimento.

Aos grupos e projetos dos quais participei — em especial o GAS e os projetos de pesquisa e extensão — agradeço pela oportunidade de aprender, crescer e aplicar na prática os conhecimentos adquiridos.

Por fim, agradeço a todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho. Cada gesto, por menor que tenha parecido, fez diferença na construção deste percurso acadêmico.

RESUMO

A manufatura aditiva, especialmente por meio da tecnologia de Modelagem por Fusão e Deposição (Fused Deposition Modeling – FDM), tem se destacado como uma alternativa viável para o desenvolvimento de soluções inovadoras na construção civil. Este trabalho investiga a aplicação da tecnologia de impressão 3D por modelagem por fusão e deposição (Fused Deposition Modeling – FDM) na fabricação de moldes destinados à produção de elementos de concreto. A pesquisa analisa os principais parâmetros de impressão e o desempenho estrutural dos moldes impressos, bem como os efeitos desses fatores sobre a precisão geométrica e o comportamento mecânico dos corpos de prova produzidos. Foram avaliados aspectos como espessura de parede, densidade de preenchimento, altura de camada, temperatura de extrusão e velocidade de impressão, com base em literatura técnica e ensaios laboratoriais. Além disso, foram considerados fatores mecânicos relacionados ao concreto, incluindo procedimentos de cura, ensaios de compressão e influência das medições dimensionais no resultado final. Os resultados demonstram que moldes impressos em polímeros como ABS e PLA apresentam desempenho satisfatório quando os parâmetros de impressão são adequadamente configurados, garantindo menor deformação térmica, maior estabilidade dimensional e moldagem eficiente do concreto. Conclui-se que a impressão 3D FDM representa uma alternativa promissora para aplicações experimentais e produção de protótipos na engenharia civil, reduzindo custos, prazos e complexidade de fabricação.

Palavras-chave: Engenharia civil; Prototipagem; Estabilidade dimensional; Parâmetros de impressão; Desempenho mecânico.

ABSTRACT

Additive manufacturing, especially through Fused Deposition Modeling (FDM) technology, has emerged as a viable alternative for developing innovative solutions in civil engineering. This study investigates the application of FDM 3D printing technology in the fabrication of molds intended for the production of concrete elements. The research analyzes key printing parameters and the structural performance of the printed molds, as well as the effects of these factors on the geometric accuracy and mechanical behavior of the specimens produced. Aspects such as wall thickness, infill density, layer height, extrusion temperature, and printing speed were evaluated based on technical literature and laboratory testing. Additionally, mechanical factors related to concrete were considered, including curing procedures, compressive strength tests, and the influence of dimensional measurements on the final result. The results demonstrate that molds printed in polymers such as ABS and PLA exhibit satisfactory performance when printing parameters are appropriately configured, ensuring reduced thermal deformation, greater dimensional stability, and efficient concrete molding. It is concluded that FDM 3D printing represents a promising alternative for experimental applications and prototyping in civil engineering, reducing costs, timeframes, and manufacturing complexity.

Keywords: Civil engineering; Prototyping; Dimensional stability; Printing parameters; Mechanical performance.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Esquema de funcionamento da impressão 3D (FDM).....	18
Figura 2 - Princípio de funcionamento de uma impressora 3D FDM.	19
Figura 3 - Representação da anisotropia gerada no material impresso	20
Figura 4 - Fórmula estrutural dos monômeros do ABS.....	21
Figura 5 - Impressão com Warping	23
Figura 6 - Exemplo de preenchimento em Giroide	26
Figura 7 - Representação dos esforços aplicados nas paredes do molde.....	26
Figura 8 - Impressora Creality CR-200B em operação durante a impressão dos moldes.	33
Figura 9 - Montagem completa dos moldes impressos.....	36
Figura 10 - Corpos de prova retificados.....	39

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Comparativo de custos entre molde metálico e molde impresso 3D.	45
Gráfico 2 - Comparativo de Resistência.	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades técnicas do filamento ABS GTMax3D.....	34
Tabela 2 - Tempo e consumo médio de impressão por componente do molde.....	35
Tabela 3 - Estimativa de custo total de fabricação de um molde em ABS impresso em 3D. ..	35
Tabela 4 - Cronograma de moldagem e ensaios de ruptura.	38
Tabela 5 - Comparativo das variações dimensionais médias entre corpos de prova moldados em ABS (impressos) e metálicos.....	43
Tabela 6 - Resultados médios de resistência e dimensões dos corpos de prova IM (impressos) e de aço (NO).....	46
Tabela 7 - Parâmetros para cálculo do Ponto de Equilíbrio (Break-even).	49

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABS	Acrilonitrila Butadieno Estireno
ASA	Acrilonitrila Estireno Acrilato
CAD	Desenho Assistido por Computador
CAPEX	Capital Expenditure
CV	Coefficiente de Variação
FDM	Fused Deposition Modeling (Modelagem por Deposição de Material Fundido)
FFF	Fabricação por Filamento Fundido
IFSertãoPE	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sertão Pernambucano
ISO	International Organization for Standardization
IM	Impresso
MA	Manufatura Aditiva
NBR	Norma Brasileira
NO	Molde em aço
OPEX	Operational Expenditure
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
PETG	Polietileno Tereftalato Glicol
PLA	Ácido Polilático
ROI	Return on Investment
Tg	Temperatura de Transição Vítrea

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	14
1.1.	CONTEXTO E MOTIVAÇÃO	14
1.2.	JUSTIFICATIVA	15
1.3.	OBJETIVO GERAL	15
1.3.1	<i>Objetivos específicos</i>	15
2.	REFERENCIAL TEÓRICO.....	17
2.1.	MANUFATURA ADITIVA.....	17
2.1.1.	<i>Princípios da tecnologia de modelagem por deposição fundida (FDM)</i>	17
2.1.2.	<i>Caracterização do Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS)</i>	20
2.1.3.	<i>Desafios Intrínsecos da Impressão 3D com ABS</i>	22
2.2.	OTIMIZAÇÃO DE PARÂMETROS DE IMPRESSÃO PARA A INTEGRIDADE ESTRUTURAL E DIMENSIONAL DE MOLDES	24
2.2.1.	MAXIMIZAÇÃO DA RIGIDEZ E RESISTÊNCIA MECÂNICA DO MOLDE	25
2.3.	DIMENSÕES DO CORPO DE PROVA E ENSAIO DE ROMPIMENTO.....	28
2.6.1.	<i>Dimensões e Normatização do Corpo de Prova</i>	28
2.3.2.	<i>Processo de cura</i>	28
2.3.3.	<i>Ensaio de Rompimento (Compressão)</i>	29
2.3.4.	<i>Medição das Dimensões</i>	30
2.3.5.	<i>Processamento dos Dados e Considerações Estatísticas</i>	31
2.4.	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	31
3.	MATERIAIS E MÉTODOS	32
3.1.	LOCAL E EQUIPAMENTOS	32
3.2.	MATERIAIS UTILIZADOS	33
3.3.	PARÂMETROS DE IMPRESSÃO	34
3.4.	CUSTOS ESTIMADOS DE FABRICAÇÃO.....	35
3.5.	PRODUÇÃO E MONTAGEM DOS MOLDES.....	36
3.6.	MOLDAGEM E CURA DOS CORPOS DE PROVA	37
3.7.	ENSAIO DE COMPRESSÃO E ANÁLISE DIMENSIONAL	38
3.8.	OBSERVAÇÕES EXPERIMENTAIS	40

4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	42
4.1.	DESEMPENHO FÍSICO E FUNCIONAL DOS MOLDES.....	42
4.2.	COMPARAÇÃO DE CUSTOS E EFICIÊNCIA PRODUTIVA.....	44
4.3.	ANÁLISE DA RESISTÊNCIA E REUSO	46
4.3.1.	<i>Superioridade na Resistência Média e Estanqueidade.....</i>	<i>47</i>
4.3.2.	<i>Consistência e Confiabilidade Experimental</i>	<i>48</i>
4.3.3.	<i>Qualidade Geométrica e Modos de Ruptura</i>	<i>48</i>
4.4.	ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA E RETORNO SOBRE O INVESTIMENTO (ROI).....	49
4.4.1	<i>Parâmetros de Custo e Manutenção</i>	<i>49</i>
4.4.2.	<i>Cálculo do Payback (Tempo de Retorno).....</i>	<i>50</i>
4.4.3.	<i>Análise Temporal de Produção</i>	<i>50</i>
4.4.4.	<i>Considerações sobre Depreciação do Equipamento.....</i>	<i>50</i>
5.	CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS.....	52
	REFERÊNCIAS	54

1. INTRODUÇÃO

1.1. CONTEXTO E MOTIVAÇÃO

A Quarta Revolução Industrial, ou Indústria 4.0, tem catalisado uma profunda transformação nos processos produtivos globais, e um de seus pilares mais disruptivos é a Manufatura Aditiva (MA), popularmente conhecida como impressão 3D. Diferente dos métodos de manufatura subtrativa tradicionais, que removem material de um bloco bruto, a MA constrói objetos tridimensionais camada por camada a partir de um modelo digital. Esta abordagem inovadora tem encontrado aplicações em diversos setores, e na Construção Civil — uma indústria caracterizada por seu tradicionalismo — seu potencial para otimização de processos, redução de custos, diminuição de desperdícios e aumento da liberdade geométrica é imenso (Craveiro, 2019).

No cerne do controle de qualidade da engenharia civil está a verificação da resistência do concreto, o material estrutural mais utilizado no mundo (Mazoni, 2024). Este controle é realizado por meio de ensaios de compressão axial em corpos de prova, cuja moldagem segue rigorosos padrões para garantir a fidedignidade dos resultados.

No Brasil, a norma ABNT NBR 5738 estabelece as especificações para este processo, exigindo o uso de moldes com dimensões, tolerâncias, rigidez e estanqueidade precisamente definidas, tradicionalmente fabricados em aço, o que os torna caros, pesados e de difícil customização.

Neste contexto, o presente trabalho se debruça sobre uma solução alternativa: a aplicação da tecnologia de impressão 3D por Modelagem por Deposição de Material Fundido (FDM) para a fabricação de moldes análogos aos normatizados. A tecnologia FDM destaca-se por sua acessibilidade e, para este estudo, foi selecionado o termoplástico Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS). A escolha do ABS se justifica por ser um material de baixo custo que apresenta, simultaneamente, alta resistência mecânica e tenacidade, características essenciais para um molde que precisa suportar a pressão do concreto fresco e ser economicamente viável (Martinez, 2019).

A relevância deste estudo reside na análise da viabilidade de substituir um processo consolidado e de alto custo por uma tecnologia flexível e de baixo investimento. Estudos de caso em outras áreas demonstram que a impressão 3D pode reduzir drasticamente os custos de fabricação de ferramentas e o tempo de produção, como demonstrado por Zier (2019) e Gallio

(2024). Além disso, a aplicação no ensino de engenharia é notável, permitindo que laboratórios e instituições de ensino realizem ensaios práticos com recursos significativamente reduzidos.

Deste modo, a presente pesquisa propõe uma investigação prática e comparativa, buscando validar a impressão 3D com filamento ABS como uma alternativa tecnicamente confiável e economicamente superior para a fabricação de moldes de corpos de prova. Espera-se, ao final, contribuir com dados relevantes que incentivem a adoção de novas tecnologias na construção civil, otimizando processos de controle de qualidade e fomentando a inovação tanto no ambiente acadêmico quanto profissional.

1.2. JUSTIFICATIVA

Estudos recentes corroboram esse potencial de otimização em diferentes vertentes da engenharia. Zier et al. (2019), por exemplo, ao analisarem a produção de protótipos e ferramentais na indústria automotiva, constataram que a substituição de métodos convencionais (como usinagem e injeção) pela tecnologia FDM resultou em uma redução de custos na ordem de 82% e uma diminuição de 96% nos prazos de fabricação. No âmbito específico da construção civil, Porto (2016) e Queiroz Junior (2024) reforçam que a manufatura aditiva não apenas viabiliza a produção de geometrias complexas dificilmente alcançáveis por moldes tradicionais, mas também promove a redução significativa de resíduos e a otimização da mão de obra no canteiro, validando a tecnologia como uma alternativa sustentável e eficiente para a produção de componentes construtivos."

1.3. OBJETIVO GERAL

Investigar a viabilidade técnica e econômica do uso da impressão 3D FDM com ABS para a confecção de moldes de corpos de prova, como alternativa para suprir demandas de laboratórios de ensino e extensão em engenharia, respeitando as exigências da ABNT NBR 5738.

1.3.1 Objetivos específicos

Para o alcance do objetivo geral, a pesquisa foi estruturada nos seguintes objetivos específicos:

- Projetar e fabricar, via impressão 3D, moldes cilíndricos com filamento ABS, seguindo as dimensões da ABNT NBR 5738;

- Realizar uma análise dimensional dos moldes impressos para verificar sua conformidade com as tolerâncias da norma;
- Moldar corpos de prova de concreto utilizando tanto os moldes de ABS quanto os moldes metálicos tradicionais;
- Executar o ensaio de resistência à compressão nos corpos de prova e comparar os resultados obtidos entre os dois métodos;
- Realizar uma análise comparativa de custo e tempo de fabricação entre o molde impresso em ABS e o molde metálico convencional.

1.4. ESTRUTURA DO TRABALHO

Os demais capítulos do trabalho estão organizados da seguinte forma: o Capítulo 2 apresenta o referencial teórico, abordando os princípios da manufatura aditiva (FDM), as propriedades do material ABS e as normas técnicas da ABNT pertinentes ao controle tecnológico do concreto. O Capítulo 3 descreve os materiais e métodos adotados, detalhando os parâmetros de impressão, o processo de fabricação dos moldes e os procedimentos experimentais de moldagem e ensaio. O Capítulo 4 expõe e discute os resultados obtidos, com ênfase na análise dimensional, no desempenho mecânico dos corpos de prova e no comparativo de custos entre os moldes. Por fim, o Capítulo 5 apresenta as conclusões acerca da viabilidade técnica e econômica da proposta, bem como sugestões para trabalhos futuros.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo serão apresentados os conceitos fundamentais que embasam este trabalho, iniciando pela Manufatura Aditiva, com foco na tecnologia de Modelagem por Deposição Fundida (FDM), e nas propriedades do Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS). A análise aborda desde os parâmetros de otimização da impressão, passando pela viabilidade estrutural do molde, até a conformidade com as normas ABNT e os procedimentos do ensaio de compressão.

2.1. MANUFATURA ADITIVA

O presente tópico explora as bases da tecnologia empregada na pesquisa. A discussão começa com os princípios da Modelagem por Deposição Fundida (FDM), descrevendo a construção de um objeto camada por camada a partir de um arquivo digital. Avançando, o texto se dedica a caracterizar o Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS), justificando sua escolha através da análise de suas principais propriedades para a aplicação proposta. A seção conclui com uma análise dos obstáculos práticos da impressão com este material, contextualizando os fenômenos de contração térmica e os problemas que precisam ser superados para a fabricação de um molde funcional.

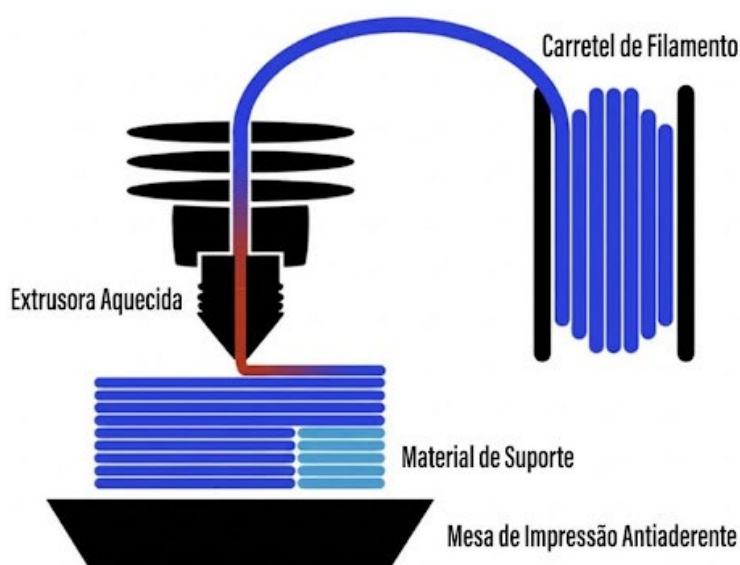
2.1.1. Princípios da tecnologia de modelagem por deposição fundida (FDM)

A Modelagem por Deposição Fundida (FDM), também conhecida como Fabricação por Filamento Fundido (FFF), é um processo de manufatura aditiva que constrói objetos tridimensionais camada por camada. O processo inicia-se com um modelo digital 3D, tipicamente criado em um software de Desenho Assistido por Computador (CAD). Este modelo é então processado por um software especializado, denominado "fatiador" (slicer), que o divide em centenas ou milhares de camadas horizontais e gera um arquivo de *G.code*. Este arquivo contém as instruções precisas de coordenadas e extrusão que guiarão a impressora 3D (Carasek *et al*, 2021).

Durante a impressão, um filamento de material termoplástico é tracionado de um carretel para uma cabeça de extrusão aquecida, conhecida como hot-end. Dentro do hot-end, o filamento é aquecido até atingir seu estado semilíquido e é forçado a passar por um bico de pequeno diâmetro.

A esquematização desse fluxo de material pode ser visualizada na Figura 1. O processo inicia-se com o tracionamento do filamento a partir do carretel (*Filament Spool*) em direção à extrusora aquecida (*Heated Extruder*). Nesta etapa, o polímero atinge a temperatura de fusão e é depositado sobre a mesa de impressão (*Print Bed*), solidificando-se ao esfriar. A imagem também destaca a deposição sequencial das camadas e a utilização de material de suporte, essencial para sustentar geometrias complexas ou em balanço durante a fabricação.

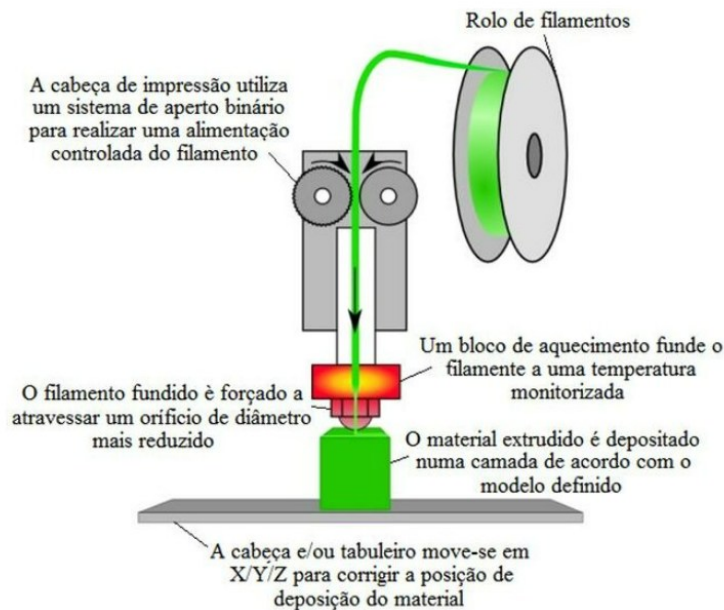
Figura 1 - Esquema de funcionamento da impressão 3D (FDM)



Fonte: University of Maryland apud Gomes et al. (2023, p. 96). Tradução e adaptação do autor.

A impressora atua movendo a cabeça de extrusão ao longo dos eixos X e Y para depositar o material, conforme o princípio cinemático demonstrado na Figura 1. Simultaneamente, o fluxo de alimentação do polímero — desde o tracionamento do carretel até a fusão na extrusora e a deposição sobre a mesa ou sobre o material de suporte — ocorre conforme detalhado no esquema da Figura 2. Uma vez concluída a camada, a plataforma se move no eixo Z (ou a cabeça sobe) na espessura programada, repetindo o ciclo até a finalização do objeto.

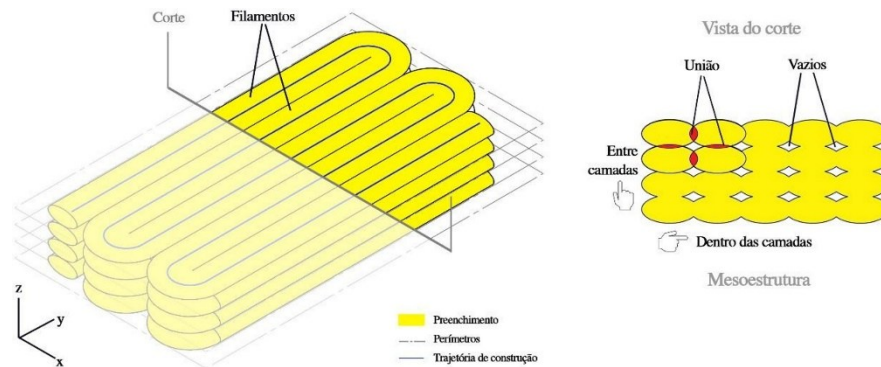
Figura 2 - Princípio de funcionamento de uma impressora 3D FDM.



Fonte: Moreira, 2016.

Esse processo de construção camada por camada, no entanto, resulta em uma característica intrínseca e de suma importância: a sua natureza anisotrópica. Em consonância com o que é abordado por Santana (2018), a resistência mecânica da peça não é uniforme em todas as direções. A adesão entre as camadas sucessivas (ao longo do eixo Z) é tipicamente o ponto mais fraco da estrutura. A força de ligação entre as camadas depende de um processo de fusão térmica e difusão de polímeros entre os filamentos adjacentes. Esta ligação é quase sempre mais fraca do que a resistência intrínseca do filamento extrudado ao longo dos planos X e Y, onde as cadeias poliméricas estão orientadas longitudinalmente. Esta anisotropia, como representado na Figura 3, é um conceito fundamental que governará toda a análise da integridade estrutural do molde de concreto, pois as tensões geradas durante a concretagem podem explorar diretamente esta fraqueza intercamadas.

Figura 3 - Representação da anisotropia gerada no material impresso



Fonte: Santana, 2018.

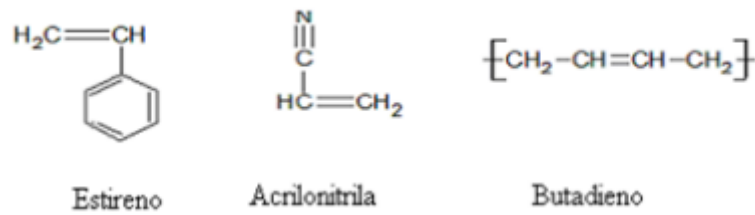
No contexto da pesquisa, a relevância da FDM para a engenharia civil reside na sua capacidade de permitir a fabricação rápida e de baixo custo de componentes customizados, como ferramentas, gabaritos, e, como foco deste estudo, fôrmas e moldes. A tecnologia elimina a necessidade de processos de usinagem caros e demorados, democratizando o acesso à fabricação de peças com geometrias complexas e permitindo ciclos de iteração de projeto muito mais rápidos.

Contudo, para que um molde impresso seja funcional na engenharia civil, não basta apenas a capacidade de produzir geometrias complexas. A sua viabilidade depende criticamente da escolha de um material com propriedades mecânicas adequadas e da otimização dos parâmetros de impressão. A seleção do material é o primeiro passo para garantir a resistência e a estabilidade dimensional. Em seguida, esta seção detalha as estratégias de parametrização para maximizar a robustez do molde, garantindo que ele possa suportar as tensões da concretagem e, ao mesmo tempo, produzir um corpo de prova que atenda às rigorosas tolerâncias dimensionais exigidas para ensaios de engenharia.

2.1.2. Caracterização do Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS)

De acordo com Reis (2021), o Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS) é um copolímero termoplástico de engenharia amplamente utilizado na indústria devido à sua combinação robusta de propriedades mecânicas e térmicas. Sua composição, um copolímero de acrilonitrila, butadieno e estireno, como mostrado na Figura 4, confere-lhe um equilíbrio notável entre rigidez, tenacidade e resistência ao impacto.

Figura 4 - Fórmula estrutural dos monômeros do ABS.



Fonte: Kurek (2014)

Por ser um termoplástico, pode ser repetidamente amolecido pelo calor e reprocessado, tornando-o ideal para o processo de extrusão da tecnologia FDM.

Para a aplicação específica na fabricação de moldes para corpos de prova de concreto, diversas propriedades do ABS são de interesse primordial (Regis, 2023):

- **Estabilidade Dimensional:** O ABS, como polímero, é reconhecido por sua alta estabilidade dimensional após o processamento, o que significa que ele tende a manter sua forma e tamanho sob diferentes condições ambientais. No entanto, é crucial distinguir a propriedade intrínseca do material da propriedade da peça final fabricada por FDM. Enquanto o polímero ABS em si é estável, o processo FDM, com seus ciclos de aquecimento e resfriamento rápidos e localizados, induz tensões internas que podem levar à instabilidade dimensional da peça impressa, um desafio que será abordado em detalhe.
- **Resistência Térmica:** O ABS possui uma temperatura de transição vítrea (T_g) de aproximadamente 105 °C e uma temperatura de deflexão térmica superior à de outros polímeros comuns de impressão 3D, como o Ácido Polilático (PLA) (Caeneiro *et al.*, 2019). Esta propriedade é de extrema importância ao considerar o calor gerado pela reação de hidratação exotérmica do cimento. Um molde deve ser capaz de manter sua rigidez e forma mesmo quando aquecido pelo concreto em processo de cura.
- **Inércia Química:** A norma brasileira ABNT NBR 5738 exige que os moldes para corpos de prova de concreto sejam confeccionados em material "quimicamente inerte com os componentes constituintes do concreto". O concreto fresco possui um ambiente altamente alcalino, com o pH médio do concreto fresco, geralmente varia entre 12 e 13 devido à presença de hidróxido de cálcio (Behnood, 2016). O ABS exibe boa resistência a álcalis, ácidos fracos e óleos, tornando-o quimicamente compatível para o contato direto com a pasta de cimento Portland sem risco de reações adversas que possam comprometer a superfície do molde ou do corpo de prova.

As aplicações do ABS são vastas, desde bens de consumo e brinquedos até componentes automotivos e capacetes de segurança, atestando sua versatilidade e confiabilidade como material de engenharia (Reis, 2021). Em seguida, esta seção detalha os desafios intrínsecos da impressão com este material, que devem ser superados para garantir que a peça final seja funcional e dimensionalmente precisa.

2.1.3. Desafios Intrínsecos da Impressão 3D com ABS

Apesar de suas propriedades desejáveis, a impressão de ABS via FDM apresenta desafios significativos que devem ser gerenciados para produzir peças funcionais e dimensionalmente precisas. Estes desafios derivam principalmente de suas características térmicas e das diferentes abordagens necessárias para combatê-las:

- **Contração Térmica e Empenamento (*Warping*):** Em justaposição ao que Andrade (2025) afirma, o ABS possui um coeficiente de expansão térmica relativamente alto. Durante o processo de impressão, à medida que o material extrudado a mais de 230 °C resfria, ele se contrai. Quando este processo ocorre de forma desigual, especialmente nas primeiras camadas que estão em contato com uma superfície mais fria (a mesa de impressão), as tensões de contração se acumulam. Essas tensões podem se tornar fortes o suficiente para superar a força de adesão da peça à mesa, fazendo com que os cantos e as bordas da peça se levantem e se deformem, como demonstrado na Figura 5. Este fenômeno, conhecido como *warping* ou empenamento, é um dos maiores obstáculos para a impressão de peças grandes e planas com ABS e compromete severamente a precisão dimensional.

Figura 5 - Impressão com Warping



Fonte: Portela, 2021

- **Delaminação e Baixa Adesão Intercamadas:** são defeitos interligados que comprometem a integridade de peças impressas, sendo causados pelo mesmo princípio da contração térmica. O problema ocorre quando uma nova camada de plástico quente é depositada sobre uma camada anterior que já esfriou demais. Essa grande diferença de temperatura impede que as superfícies se fundam adequadamente, resultando em uma "solda" fraca entre elas, o que é definido como baixa adesão intercamadas. A delaminação, por sua vez, é a consequência visível dessa falha: quando a peça é submetida a esforços mecânicos ou mesmo às tensões do próprio material, essa ligação fraca se rompe e as camadas se separam, criando rachaduras (3D Lab, 2020). Esse fenômeno, especialmente comum em peças altas, torna o objeto final frágil e completamente inutilizável para aplicações estruturais, como a de um molde

Para mitigar esses problemas, o controle do ambiente térmico durante a impressão é absolutamente crítico. As duas estratégias mais importantes, como mostrado por Carneiro (2019), são:

- **Mesa Aquecida:** O uso de uma mesa de impressão aquecida a temperaturas em torno de 100 °C é considerado obrigatório para imprimir com ABS. A mesa aquecida mantém as primeiras camadas da peça em uma temperatura elevada, reduzindo o gradiente térmico, aliviando as tensões de contração e melhorando significativamente a adesão da peça à superfície, prevenindo o *warping*.
- **Impressora Enclausurada (Gabinete):** A estratégia mais eficaz para garantir impressões de alta qualidade com ABS é utilizar uma impressora com um gabinete

fechado. Um ambiente enclausurado retém o calor irradiado pela mesa e pelo bico extrusor, criando uma câmara com temperatura ambiente elevada e estável (idealmente acima de 40 °C). Isso minimiza o resfriamento prematuro das camadas, promove uma fusão intercamadas muito mais forte e robusta, e reduz drasticamente tanto o *warping* quanto a delaminação.

Como abordado no trabalho de Azeem (2024), a geometria de um molde cilíndrico, quando impresso na orientação vertical, apresenta um desafio particular que expõe a fraqueza fundamental da anisotropia da impressão FDM. A pressão hidrostática exercida pelo concreto fresco atua radialmente, gerando uma tensão circunferencial (conhecida como *hoop stress*). Esta tensão tenta expandir o diâmetro do molde. Em um cilindro impresso verticalmente, as linhas de camada são anéis empilhados.

A tensão circunferencial, portanto, atua perpendicularmente a essas linhas de camada, aplicando força diretamente na interface de adesão entre elas, que é o ponto mais fraco da peça. Conseqüentemente, a orientação de impressão mais intuitiva é, paradoxalmente, a mais vulnerável à falha por delaminação sob carga. Este fato sugere que a orientação de impressão não é apenas um parâmetro de processo, mas um parâmetro de projeto fundamental. Uma abordagem alternativa, como a fabricação de um molde bipartido impresso na horizontal, poderia alinhar os filamentos contínuos para resistir a essa tensão circunferencial, resultando em uma peça significativamente mais forte.

Em seguida, esta seção detalha o conjunto completo de estratégias de parametrização para maximizar a integridade estrutural e dimensional do molde, garantindo que ele possa suportar as tensões da concretagem e manter a precisão exigida para os ensaios.

2.2. OTIMIZAÇÃO DE PARÂMETROS DE IMPRESSÃO PARA A INTEGRIDADE ESTRUTURAL E DIMENSIONAL DE MOLDES

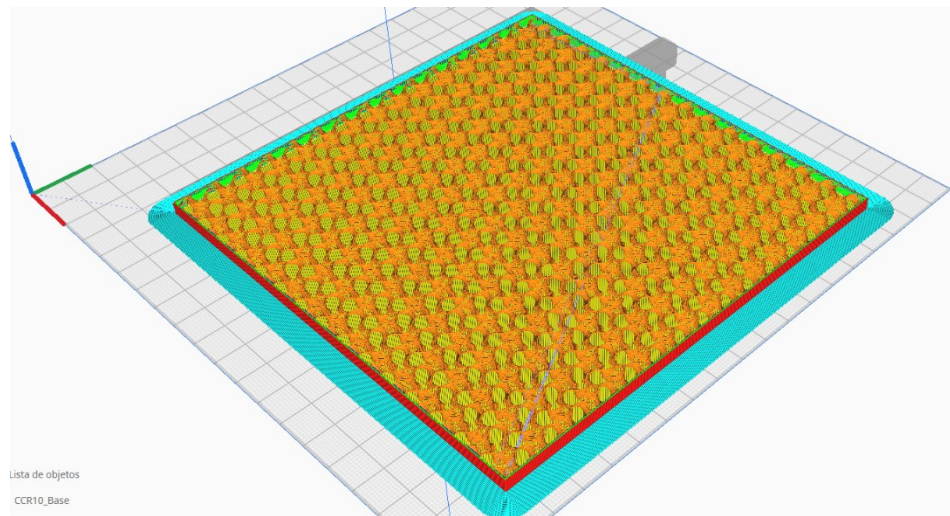
A fabricação de um molde de ABS funcional para corpos de prova de concreto transcende a simples seleção do material; ela exige uma otimização metódica dos parâmetros de impressão no software fatiador. Cada configuração influencia diretamente um delicado equilíbrio entre resistência mecânica, precisão dimensional, qualidade superficial e tempo de impressão. Esta seção detalha as estratégias de parametrização para maximizar a robustez do molde, garantindo que ele possa suportar as tensões da concretagem e, ao mesmo tempo, produzir um corpo de prova que atenda às rigorosas tolerâncias dimensionais exigidas para ensaios de engenharia.

2.2.1. Maximização da rigidez e resistência mecânica do molde

Para que o molde de ABS mantenha sua forma cilíndrica sob a pressão do concreto fresco, sua rigidez e resistência à delaminação devem ser maximizadas. De acordo com Carneiro et al. (2019), isso é alcançado através do controle preciso de parâmetros térmicos e estruturais.

- **Temperatura de Extrusão e de Mesa:** A temperatura é o fator mais crítico para a qualidade da ligação entre as camadas. Temperaturas de extrusão mais altas, dentro da faixa recomendada pelo fabricante do filamento (tipicamente entre 210 °C e 240 °C para ABS), promovem uma melhor fusão do polímero. Uma temperatura mais elevada reduz a viscosidade do material extrudado, permitindo que ele flua melhor e se funda mais completamente com a camada subjacente antes de solidificar. Isso cria uma ligação molecular mais forte, aumentando a resistência à tração no eixo Z e combatendo a delaminação. A temperatura da mesa deve ser mantida consistentemente em torno de 100 °C para garantir a adesão da base e minimizar o gradiente térmico vertical na peça.
- **Densidade e Padrão de Preenchimento (*Infill*):** O preenchimento é a estrutura interna da peça e contribui significativamente para sua resistência e rigidez globais, como é exemplificado na Figura 6. A densidade de preenchimento, expressa em porcentagem, tem uma correlação direta com a resistência. Estudos como o de Shimano *et al.* (2018) demonstram que o aumento da porcentagem de preenchimento eleva a resistência à compressão das peças de ABS. No mesmo trabalho de Shimano *et al.* (2018), o aumento do preenchimento de 15% para 30% resultou em um aumento de considerável na força máxima de compressão suportada por corpos de prova de ABS. Para um molde que deve resistir à pressão em todas as direções, um preenchimento alto, na faixa de 40% a 100%, é recomendado para evitar a flexão das paredes. O padrão de preenchimento também é crucial. Padrões bidimensionais como "Linhas" ou "Zigue-zague" são rápidos, mas fornecem resistência principalmente em duas direções. Para uma aplicação como um molde, que sofre tensões tridimensionais, padrões como "Cúbico", "Subdivisão Cúbica" ou "Giroide" (Figura 6), - o qual foi o escolhido nessa pesquisa -, são superiores, pois são projetados para distribuir a carga de forma mais isotrópica, ou seja, de maneira mais uniforme em todas as direções.

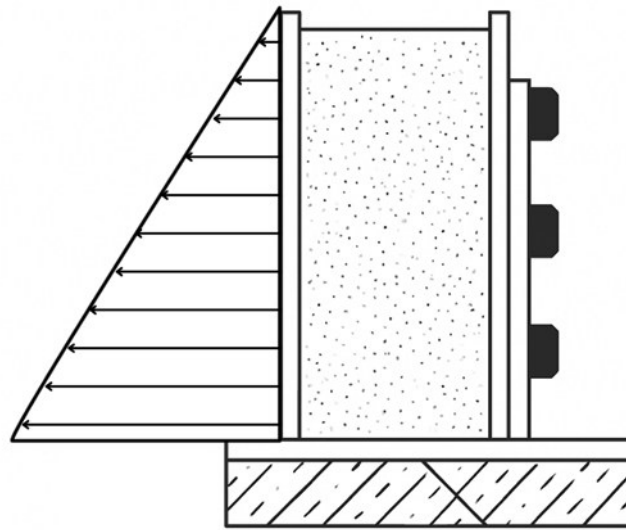
Figura 6 - Exemplo de preenchimento em Giroide



Fonte: Autoria Própria, 2025.

- **Espessura da parede na impressão FDM:** é determinada pelo número de perímetros externos (camadas contíguas) e pela largura real da extrusão. Em geral, a largura da extrusão é ligeiramente maior que o diâmetro do bocal, dependendo da altura de camada empregada (Filament2print, 2022). Assim, a espessura total da parede é obtida multiplicando-se o número de perímetros pela largura da linha extrudada. Por exemplo, usando bocal de 0,4 mm e três perímetros, obtém-se cerca de 1,2 mm de espessura de parede (Mazlan *et al*, 2023). Segundo a Polymaker (2025), a espessura da parede deve ser sempre múltiplo inteiro do diâmetro do bico; por isso, recomenda-se ao menos de 2 a 3 perímetros em peças correntes para garantir estabilidade estrutural, garantir a resistência aos esforços solicitantes, como na Figura 7 e evitar que a geometria interna fique exposta. Práticas de fatiamento sugerem que a espessura mínima da parede seja em torno de 1 mm (Filament2print, 2022; Polymaker, 2025), pois paredes muito finas (abaixo de 1 mm) tendem a não conferir resistência suficiente e podem apresentar falhas de impressão.

Figura 7 - Representação dos esforços aplicados nas paredes do molde



Fonte: Autoria Própria, 2025.

- **Velocidade de Impressão:** A velocidade de impressão é quase sempre inversamente proporcional à qualidade da peça e à força de adesão entre as camadas. Velocidades de impressão mais lentas, na faixa de 30 a 60 mm/s, permitem mais tempo para que cada camada de material fundido transfira calor para a camada anterior, resultando em uma fusão mais completa e uma ligação mais forte. Impressões rápidas podem não permitir tempo suficiente para essa fusão, resultando em uma peça com menor integridade estrutural (Santos, 2023).

Aumentar o número de perímetros normalmente reforça a peça impressa. Mazlan *et al.* (2023) e Nikiema *et al.* (2023) demonstraram que maior quantidade de paredes externas eleva significativamente a rigidez e resistência mecânica das peças. Esses trabalhos mostram que as paredes atuam como “fundação” do objeto impresso, sendo responsáveis por grande parte da carga suportada. Por exemplo, Nikiema *et al.* (2023) constatou que aumentar o número de paredes resultou em ganhos expressivos no módulo de Young e na resistência à tração do material Onyx reforçado com fibra.

O módulo de Young é um parâmetro que caracteriza o comportamento de um material elástico, segundo a direção na qual se aplica uma força. É um dos métodos mais completos para conhecer a elasticidade de um material (ORTIZ-DOMÍNGUEZ *et al.*, 2022, p. 52, tradução do autor).

Em consonância, a Polymaker (2025) sugere que, para componentes sujeitos a esforço externo, convém priorizar o aumento dos perímetros em vez do preenchimento interno, pois *casca*s mais espessas fornecem melhor relação resistência/material do que aumento de infill. Por exemplo, em aplicações de alta demanda, 4–6 perímetros (1,6–2,4 mm com bico de 0,4 mm)

são recomendados para tornar a parede praticamente sólida.

2.3. DIMENSÕES DO CORPO DE PROVA E ENSAIO DE ROMPIMENTO

Este tópico aborda as especificações dimensionais, os procedimentos de cura e ensaio estabelecidos pela normativa brasileira para corpos de prova de concreto. A precisão nestas etapas é fundamental para garantir a confiabilidade dos resultados de resistência e validar a eficácia dos moldes produzidos por impressão 3D, assegurando que estes sejam análogos aos moldes metálicos convencionais.

2.6.1. Dimensões e Normatização do Corpo de Prova

A conformidade geométrica dos corpos de prova é fundamental para assegurar a precisão dos resultados obtidos durante o ensaio de compressão. Segundo a ABNT NBR 5738 (2015), o corpo de prova cilíndrico deve ter altura igual ao dobro do seu diâmetro e apresentar diâmetro mínimo correspondente a três vezes o diâmetro máximo do agregado graúdo presente no concreto. Isso garante que as tensões internas se distribuam de maneira uniforme durante o carregamento.

No mesmo trabalho de Ahmad et al. (2020), verificou-se que pequenas variações dimensionais — como diferenças de 2 mm no diâmetro — resultaram em diferenças superiores a 5% na resistência à compressão, mostrando que a precisão geométrica do molde é determinante.

Para o presente estudo, adotou-se o corpo de prova de 75×150 mm, apropriado para concretos com agregado máximo de 19 mm, conforme a ABNT NBR 5738 (2015). Mehta e Monteiro (2014) reforçam que corpos de prova menores, quando bem capeados e centralizados, apresentam resultados equivalentes aos de dimensões maiores, mantendo validade estatística.

2.3.2. Processo de cura

A etapa de cura dos corpos de prova exerce papel central no desenvolvimento das propriedades mecânicas do concreto, uma vez que controla diretamente a taxa e a eficiência das reações de hidratação do cimento. Segundo a ABNT NBR 5738 (2015), após a moldagem, os corpos de prova devem permanecer nas primeiras 24 horas em ambiente protegido de vibrações, com umidade relativa igual ou superior a 95% e temperatura controlada de 20 ± 2 °C. Essas

condições são projetadas para minimizar a perda de água por evaporação e garantir que as reações iniciais de hidratação ocorram de forma contínua e estável.

Diversos autores ressaltam que a fase inicial de cura é a mais sensível e influente no ganho de resistência. No estudo de Shimano et al. (2018), verificou-se que pequenas variações de temperatura durante o período inicial — mesmo desvios de 3 a 4 °C — resultaram em diferenças superiores a 6 MPa na resistência à compressão aos 28 dias, evidenciando a elevada sensibilidade da hidratação inicial às condições ambientais. Neville (2016) reforça esse entendimento ao apontar que a cura inadequada nos primeiros dias pode reduzir a resistência final em até 30%, especialmente em concretos com relação água/cimento elevada.

A literatura recente também demonstra que a taxa de ganho de resistência depende fortemente do método de cura empregado. Luping e Nilsson (2021) observaram que corpos de prova mantidos em câmara úmida apresentaram evolução mecânica mais uniforme do que aqueles curados ao ar, devido ao risco de retração plástica e microfissuração superficial.

Narayanan (2024) destaca ainda que irregularidades no processo de cura não afetam apenas a resistência, mas também propriedades como absorção capilar, durabilidade e permeabilidade, fatores fundamentais para a interpretação dos resultados experimentais.

2.3.3. Ensaio de Rompimento (Compressão)

O ensaio de compressão axial foi conduzido de acordo com a ABNT NBR 5739 (2018), que estabelece procedimentos rigorosos para garantir repetibilidade e confiabilidade. Entre os critérios mais relevantes encontra-se a velocidade de aplicação de carga, que deve ser mantida em $0,45 \pm 0,15$ MPa/s, evitando aceleração abrupta ou variações bruscas de carregamento que possam alterar o comportamento frágil do concreto.

Outro aspecto crítico refere-se ao alinhamento do corpo de prova. A norma exige que a superfície superior esteja perfeitamente perpendicular ao eixo do cilindro e que o corpo de prova seja centrado com precisão entre os pratos da prensa. Neville (2016) explica que desalinhamentos de apenas alguns milímetros provocam distribuição desigual das tensões, levando a concentrações localizadas que reduzem a resistência aparente em até 20%.

Narayanan (2024), no mesmo sentido, ressalta que corpos de prova de diferentes dimensões apresentam comportamentos distintos devido ao *size effect*. Corpos de prova menores tendem a apresentar resistências aparentes mais elevadas, não por melhoria do material, mas pela menor probabilidade estatística de conter defeitos críticos ao romper, e pela menor energia de fratura envolvida no processo. Portanto, interpretações comparativas devem

considerar esse fenômeno, especialmente quando diferentes tamanhos de corpos de prova são utilizados.

Os modos de ruptura aceitáveis — cônica, cisalhante ou explosiva controlada — são definidos pela ABNT NBR 5739 (2018). Qualquer ruptura irregular, como fraturas inclinadas não típicas ou desagregação prematura, invalida o ensaio por indicar problemas de cura, defeitos geométricos ou carregamento excêntrico. Como observam Mehta e Monteiro (2014), o padrão de fratura é um indicador valioso da qualidade do ensaio, auxiliando na identificação de eventuais erros sistemáticos no processo.

2.3.4. Medição das Dimensões

A medição das dimensões dos corpos de prova é uma etapa fundamental na determinação da resistência à compressão do concreto, pois qualquer imprecisão afeta diretamente o cálculo da área de ruptura e, conseqüentemente, o valor da tensão resistente. A ABNT NBR 5739 (2018) estabelece que o diâmetro e a altura dos corpos de prova cilíndricos devem ser determinados com instrumentos de precisão mínima de 0,1 mm, garantindo fidelidade geométrica para o cálculo da área transversal.

Entre os instrumentos tradicionalmente empregados na engenharia civil, destaca-se o paquímetro analógico, amplamente utilizado pela sua robustez, estabilidade mecânica e confiabilidade em medições milimétricas. De acordo com Ghiassi e De Brito (2020), instrumentos analógicos apresentam menor suscetibilidade a falhas eletrônicas e são adequados para medições repetitivas em laboratório, desde que devidamente calibrados e inspecionados quanto ao paralelismo das faces de contato. Nesse sentido, Neville (2016) reforça que "a precisão da medição das dimensões é essencial, pois erros de frações de milímetro no diâmetro podem ocasionar diferenças significativas no cálculo da resistência" (p. 284).

A literatura mostra que pequenas imprecisões geométricas têm impacto expressivo na resistência calculada. Luping e Nilsson (2021) demonstraram que variações de aproximadamente 0,3 mm no diâmetro — valor comum quando o paquímetro não é aplicado corretamente ou quando o operador exerce pressão excessiva — podem gerar diferenças de até 2 MPa na resistência final. Isso ocorre porque a área da seção transversal aumenta com o quadrado do raio, amplificando erros aparentemente pequenos. Mehta e Monteiro (2014) complementam que irregularidades no corte, esfolamentos nas arestas e variações micrométricas superficiais também influenciam a precisão, principalmente em corpos de prova moldados sem rebarbamento.

2.3.5. Processamento dos Dados e Considerações Estatísticas

A interpretação dos resultados de ensaios de compressão envolve a aplicação de critérios estatísticos rigorosos. A ABNT NBR 5739 (2018) estabelece que cada resultado individual deve ser calculado a partir do quociente entre a carga máxima suportada e a área real do corpo de prova. Já a ABNT NBR 12655 (2015) orienta sobre o tratamento estatístico necessário para séries pequenas e grandes, enfatizando a importância da avaliação do coeficiente de variação para determinar a homogeneidade dos dados.

Mehta e Monteiro (2014) argumentam que concretos com variabilidade significativa demandam técnicas complementares, como análise de distribuição de Weibull, especialmente quando há suspeita de defeitos internos ou heterogeneidade de adensamento. Narayanan (2024) destaca que o efeito de escala (*size effect*) deve ser considerado no tratamento estatístico, pois corpos de prova menores tendem a apresentar resistências superiores devido à menor probabilidade estatística de conter falhas críticas internas.

2.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo, foram apresentados os principais conceitos sobre a Manufatura Aditiva, com ênfase na tecnologia de Modelagem por Deposição Fundida (FDM) e nas propriedades físico-químicas do polímero ABS. Discutiu-se a influência crítica dos parâmetros de impressão — como temperatura de extrusão, densidade de preenchimento e espessura de parede — na integridade estrutural e estabilidade dimensional dos moldes. Além disso, fundamentou-se a pesquisa nas normas técnicas vigentes (ABNT NBR 5738 e NBR 5739), estabelecendo os critérios de moldagem, cura e ensaio de compressão necessários para validar a substituição dos moldes metálicos. Essa base teórica evidencia que, apesar dos desafios intrínsecos à anisotropia da impressão 3D, a tecnologia possui potencial técnico para atender aos rigorosos requisitos de controle de qualidade na construção civil, preparando o terreno para a metodologia experimental descrita a seguir.

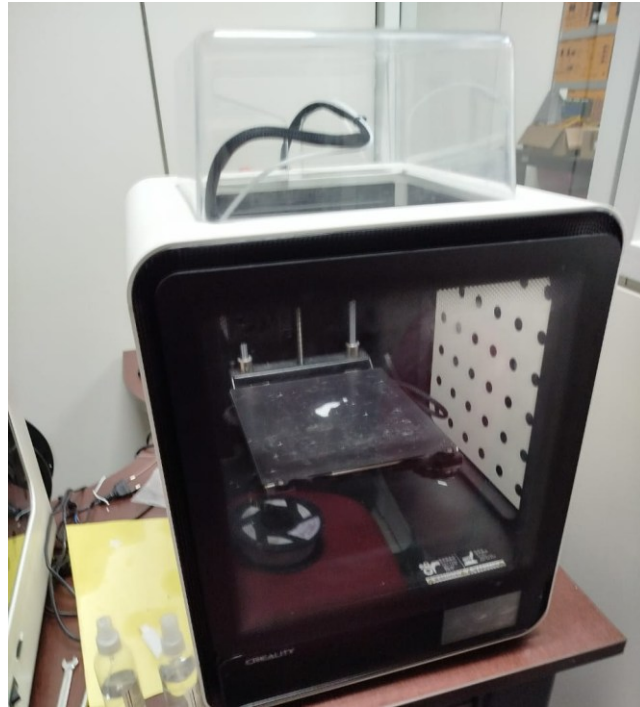
3. MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo descreve detalhadamente os materiais empregados e os procedimentos experimentais adotados para o desenvolvimento e análise dos moldes impressos em 3D para concretagem de corpos de prova cilíndricos conforme a ABNT NBR 5738:2015. Para uma melhor compreensão, o capítulo está estruturado da seguinte forma: inicialmente, são apresentados o local, os equipamentos e os materiais utilizados na pesquisa. Na sequência, detalham-se os parâmetros de impressão adotados e a estimativa de custos de fabricação. Posteriormente, descreve-se o processo prático de produção e montagem dos moldes, bem como a moldagem e cura dos corpos de prova. Por fim, são apresentados os procedimentos para o ensaio de compressão, a análise dimensional e as observações experimentais decorrentes do estudo.

3.1. LOCAL E EQUIPAMENTOS

O estudo foi realizado em ambiente laboratorial, com utilização de uma impressora 3D Creality CR-200B, segundo o Manual do Usuário da Creality (V2.0). A impressora 3D modelo CR-200B oferece um volume de impressão de 200x200x200mm, operando com uma fonte de alimentação de 350W e um bico extrusor padrão de 0.4mm. Na mesma documentação técnica, é detalhado que o equipamento atinge uma precisão de ± 0.1 mm e suporta temperaturas de até 100°C na mesa aquecida e até 250°C no bico, sendo projetada especificamente para trabalhar com filamento PLA e ABS de 1.75mm. O equipamento foi selecionado por estar prontamente disponível no laboratório do campus Serra Talhada do IFSertãoPE, onde o estudo foi conduzido, além de oferecer controle térmico estável e ser compatível com filamentos técnicos, como o ABS utilizado nesta pesquisa, conforme apresentado na Figura 8.

Figura 8 - Impressora Creality CR-200B em operação durante a impressão dos moldes.



Fonte: Autoria própria, 2025.

3.2. MATERIAIS UTILIZADOS

O material escolhido para a confecção dos moldes foi o filamento ABS GTMax3D, comercializado em rolos de 1 kg, com diâmetro de 1,75 mm. A escolha se deveu à boa resistência térmica, rigidez e adesão entre camadas, características essenciais para garantir a integridade do molde durante a concretagem, parâmetros observados tanto empiricamente, quanto descrito pelo fabricante na Tabela 1.

A cor do material foi considerada irrelevante para o desempenho do produto final, sendo o foco voltado às propriedades mecânicas e estabilidade dimensional.

Os moldes foram projetados com espessura de parede de 2,0 mm, definição alcançada após um processo iterativo que combinou simulações de fatiamento (*slicing*) no software Creality Slicer com verificações empíricas de rigidez. Na fase de parametrização, foram testados protótipos com espessura reduzida de 1,0 mm visando a otimização de tempo; contudo, estes apresentaram instabilidade geométrica e flexibilidade excessiva, características incompatíveis com a necessidade de conter a pressão lateral exercida pelo concreto fresco. A opção por 2,0 mm demonstrou o equilíbrio ideal, corroborando os estudos de Mazlan *et al.* (2023) e as diretrizes da Polymaker (2025), que indicam que o aumento do número de perímetros (paredes) é preponderante para a resistência mecânica da peça impressa. Cabe

ressaltar as limitações desta etapa: as simulações em fatiador consideraram parâmetros de deposição e consumo, não contemplando a análise de elementos finitos sob cargas de empuxo ou o comportamento térmico do polímero frente à exotermia da hidratação, variáveis que foram validadas posteriormente durante os ensaios experimentais de concretagem.

Tabela 1 - Propriedades técnicas do filamento ABS GTMax3D.

<i>Propriedade</i>	<i>Método de Ensaio (Norma ISO)</i>	<i>Unidade</i>	<i>Valor</i>
<i>Material</i>	—	—	ABS GP35 (Premium)
<i>Cor disponível</i>	—	—	Todas as cores
<i>Diâmetro nominal do filamento</i>	—	mm	1,75
<i>Temperatura de transição vítrea (Tg)</i>	—	°C	100
<i>Temperatura de extrusão (bico)</i>	—	°C	210 – 250
<i>Temperatura da mesa aquecida</i>	—	°C	100 – 130
<i>Velocidade de impressão recomendada</i>	—	mm/s	até 180
<i>Resistência a tensão</i>	ISO 527	kg/m ²	448
<i>Alongamento na ruptura</i>	ISO 527	%	12
<i>Módulo de flexão</i>	ISO 2039-1	kg/cm ²	23453
<i>Dureza (Escala Rockwell R)</i>	ISO 2039-1	—	100
<i>Resistência ao impacto (IZOD, 23 °C)</i>	ISO 180/A	Kg-cm/cm	22,4

Fonte: GTMax3D, [s.d.].

3.3. PARÂMETROS DE IMPRESSÃO

Os parâmetros de impressão foram definidos com base em testes exploratórios e recomendações técnicas do fabricante do filamento (GTMax3D). A temperatura do bico extrusor foi fixada em 240 °C, enquanto a temperatura da mesa aquecida foi ajustada para 100 °C, o valor máximo permitido pelo equipamento. A altura de camada foi de 0,2 mm, com preenchimento interno de 20%. Este valor foi definido visando um equilíbrio adequado entre a rigidez estrutural necessária para suportar a concretizarem e a otimização do tempo de impressão.

A velocidade média de impressão foi mantida em 80 mm/s, garantindo boa adesão entre camadas e acabamento superficial adequado.

O processo completo de fabricação foi dividido por componentes, conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 - Tempo e consumo médio de impressão por componente do molde.

<i>Componente</i>	<i>Massa (g)</i>	<i>Quantidade (un.)</i>	<i>Massa Total (g)</i>
<i>Capas</i>	47,35 (média)	2	94,7
<i>Pinos</i>	2,5	6	15,0
<i>Travas</i>	2,3	6	13,8
<i>Base</i>	27,2	1	27,2
<i>Total</i>			150,7 g

Fonte: Autoria própria, 2025.

A análise dos dados apresentados na Tabela 2 revela um consumo de material extremamente reduzido, inerente ao processo de manufatura aditiva. O peso total do conjunto impresso (150,7 g) contrasta significativamente com o peso médio de 1.967,2 g dos moldes metálicos utilizados. Essa redução de massa, superior a 90%, implica em uma melhoria substancial na ergonomia e facilidade de manuseio durante as atividades laboratoriais, reduzindo o esforço físico necessário para o transporte e manipulação de múltiplas amostras simultaneamente, além de facilitar o armazenamento. A abordagem modular, com componentes leves e de montagem intuitiva, atende plenamente ao requisito da ABNT NBR 5738 de que o molde deve "permitir fácil desmoldagem, sem danificar os corpos de prova".

3.4. CUSTOS ESTIMADOS DE FABRICAÇÃO

Para o cálculo do custo de fabricação, considerou-se o preço médio do rolo de ABS de 1 kg em junho de 2025, equivalente a R\$ 70,00, e o custo médio da energia elétrica residencial em Serra Talhada (PE), de R\$ 1,10 por kWh.

Com base na massa total utilizada e no tempo de impressão, o custo aproximado de um molde completo impresso em ABS foi estimado conforme a Tabela 3.

Tabela 3 - Estimativa de custo total de fabricação de um molde em ABS impresso em 3D.

<i>Item</i>	<i>Custo Unit. (R\$)</i>	<i>Quant. (un.)</i>	<i>Custo de Material (R\$)</i>
<i>Capas</i>	4,33	2	8,66
<i>Pinos</i>	0,35	6	2,10
<i>Travas</i>	0,34	6	2,04
<i>Base</i>	3,30	1	3,30
<i>Custo Total</i>			R\$ 16,10

Fonte: Autoria própria, 2025.

Os dados consolidados na Tabela 3 evidenciam a disparidade econômica entre os

métodos de fabricação. Enquanto o custo de material para a produção do molde em ABS foi de apenas R\$ 16,10, o valor de mercado de um molde metálico análogo, consultado em plataformas de *E-commerce* em novembro de 2025, supera os R\$ 100,00. Isso representa uma economia direta de aproximadamente 85% por unidade produzida.

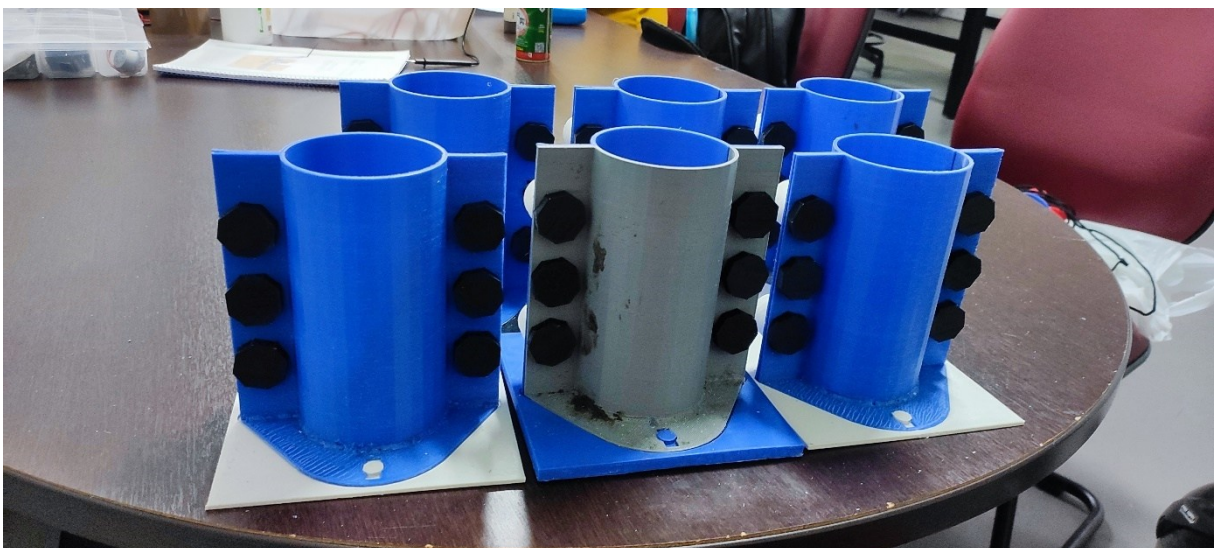
Tal diferença confirma a hipótese de que a manufatura aditiva oferece uma relação custo-benefício extremamente favorável, especialmente para instituições de ensino e pesquisa que operam com orçamentos restritos, democratizando o acesso a equipamentos normatizados. A viabilidade econômica é um complemento crucial à viabilidade técnica, que exige que os moldes sejam de "material não absorvente, que não reaja com o cimento Portland, e suficientemente resistentes para manter sua forma durante a operação de moldagem" (ABNT NBR 5738, 2025), requisito atendido pelo ABS.

3.5. PRODUÇÃO E MONTAGEM DOS MOLDES

Foram produzidos 6 moldes cilíndricos impressos em 3D, que foram comparados com 5 moldes metálicos convencionais (em aço), número limitado pela disponibilidade de equipamentos no laboratório.

Após a impressão, os componentes foram limpos e montados. A montagem foi realizada manualmente, com fixação dos pinos e travas, garantindo o fechamento preciso das duas metades cilíndricas e o correto encaixe na base, como mostrado na Figura 9.

Figura 9 - Montagem completa dos moldes impressos.



Fonte: Autoria própria, 2025.

Imediatamente após a montagem e antes dos ensaios de concretagem, foi realizada uma

aferição dimensional para comparar as características dos moldes metálicos (convencionais) com os moldes fabricados em ABS. As medições foram realizadas com paquímetro analógico e balança de precisão:

- Moldes Metálicos (Convencionais): Os moldes em aço, já em uso no laboratório, apresentaram maior robustez (peso médio de 1967,2 g e espessura de parede média de 3,27 mm). No entanto, possivelmente devido ao desgaste natural pelo uso prolongado, exibiram maior variação no diâmetro interno (média de 75,43 mm) e na altura interna (média de 150,57 mm).
- Moldes Impressos (ABS): Os moldes recém-fabricados em ABS apresentaram um peso total de 150,7 g e espessura de parede de 2,05 mm, conforme projetado. Demonstraram maior consistência dimensional, com diâmetro interno médio de 74,92 mm e altura interna média de 150,58 mm.

Concluída a montagem e caracterização, os moldes foram submetidos a um teste preliminar de estanqueidade com concreto. A avaliação da estanqueidade foi realizada por meio de inspeção visual monitorada durante o lançamento e o adensamento. Optou-se por este método devido à elevada relação água/cimento (1,0) da mistura utilizada, a qual confere alta fluidez à pasta; nessas condições, qualquer falha na vedação das junções resultaria em percolação visível de nata de cimento ou exsudação externa imediata. Nenhum dos moldes impressos apresentou vazamentos, manchas de umidade nas emendas ou deformações perceptíveis nesta etapa. Contudo, reconhece-se como limitação do estudo a ausência de um controle quantitativo de perda de massa ou volume de pasta, recomendando-se tal aferição em pesquisas futuras para uma validação reológica mais rigorosa.

3.6. MOLDAGEM E CURA DOS CORPOS DE PROVA

Foram moldados corpos de prova cilíndricos de 75 mm de diâmetro e 150 mm de altura. O concreto utilizado foi dosado com um traço em volume de 1:1,5:3 (cimento:areia:brita), com uma relação água/cimento (a/c) de 1,0. A consistência da mistura foi verificada por meio do ensaio de abatimento do tronco de cone (*Slump Test*), registrando-se um valor de 85 mm (8,5 cm). A definição deste traço e os parâmetros de trabalhabilidade seguiram as diretrizes de dosagem empírica estabelecidas nas tabelas de Caldas Branco (Branco, [s.d.]), que indicam esta faixa de abatimento como adequada para moldagem manual, garantindo a preenchibilidade dos moldes impressos sem a necessidade de vibração mecânica excessiva. O agregado miúdo (areia) utilizado possui módulo de finura de 2,23, classificado como areia fina. O agregado graúdo

convencional foi a Brita 0 (pedrisco), com módulo de finura de 1,55. A moldagem seguiu as recomendações da NBR 5738 para assegurar a compatibilidade entre os ensaios.

O concreto foi vertido em duas camadas, adensadas manualmente com haste metálica, e os moldes permaneceram em repouso por 24 horas antes da desmoldagem. Em seguida, os corpos de prova foram identificados e armazenados em câmara úmida para cura nas idades de 7, 21 e 28 dias.

A Tabela 4 apresenta o cronograma de moldagem e rompimento dos corpos de prova.

Tabela 4 - Cronograma de moldagem e ensaios de ruptura.

<i>Idade de ruptura (dias)</i>	<i>Corpos de prova moldados em abs (un.)</i>	<i>Corpos de prova em aço (un.)</i>	<i>Situação observada</i>
7	2	1	Moldes semelhantes, sem diferenças aparentes.
21	2	2	Moldes íntegros.
28	2	2	Moldes e corpos de prova em perfeitas condições

Fonte: Autoria própria, 2025.

A análise do cronograma apresentado na Tabela 4 revela a estratégia de controle tecnológico adotada, baseada nas idades de referência de 7, 21 e 28 dias. A ruptura aos 7 dias é fundamental para verificar a evolução inicial da resistência do concreto (geralmente atingindo cerca de 70% da carga final (Branco, [s.d.]), enquanto os 28 dias representam a idade padrão para a resistência característica. O dado mais relevante desta tabela, contudo, encontra-se na coluna 'Situação observada': a constatação de que os moldes em ABS permaneceram 'íntegros' e produziram corpos de prova 'semelhantes' aos de aço comprova que a impressão 3D suportou as reações químicas e físicas da cura sem sofrer deformações, validando funcionalmente a substituição do molde metálico.

3.7. ENSAIO DE COMPRESSÃO E ANÁLISE DIMENSIONAL

Conforme o cronograma (Tabela 4), ao atingirem as idades de ruptura (7, 21 e 28 dias), os corpos de prova foram retirados da câmara úmida. As faces de topo foram devidamente retificadas para garantir o paralelismo da aplicação da carga, como mostra a Figura 10

Figura 10 - Corpos de prova retificados.



Fonte: Autoria própria, 2025.

Antes do rompimento, foi realizada a análise dimensional. Utilizando um paquímetro analógico, aferiu-se a altura e o diâmetro de cada corpo de prova. Foram realizadas três medições em posições distintas para cada dimensão, sendo utilizado o valor médio nos cálculos de resistência.

Os ensaios de compressão axial seguiram os procedimentos da ABNT NBR 5739. Os corpos de prova foram rompidos na prensa hidráulica do laboratório da marca InterMetric, como mostrado na Figura 11, onde foram registradas a carga máxima de ruptura (kN) e o modo de fratura.

Figura 11 - Prensa utilizada para o rompimento.



Fonte: Autoria própria, 2025.

3.8. OBSERVAÇÕES EXPERIMENTAIS

Durante todo o processo de moldagem e cura, os moldes impressos em ABS não apresentaram vazamentos, deformações ou falhas estruturais. Após a concretagem, mantiveram-se íntegros e apresentaram altas precisões de altura e diâmetro, inclusive superiores às observadas nos moldes metálicos disponíveis no laboratório, que já apresentavam certo desgaste por uso prolongado.

Mesmo que obtida uma boa resistência, observou-se que os moldes impressos requerem cuidado no manuseio e na limpeza, devido à menor rigidez do ABS em comparação ao aço. Ainda assim, mostraram-se completamente funcionais, podendo ser reutilizados após o ensaio sem qualquer dano aparente.

Apesar dos resultados satisfatórios quanto à funcionalidade e conformidade com a ABNT NBR 5738, o experimento revelou limitações intrínsecas ao processo de manufatura. A principal restrição observada foi o tempo de produção. Para a fabricação completa de um único molde (corpo, base e travamentos), o tempo de impressão chegou a 960 minutos (16 horas). Esse fator dificulta o escalonamento rápido para grandes volumes de moldes em curto prazo, caso se disponha de apenas uma impressora. Além disso, reitera-se a necessidade de cautela na limpeza mecânica das peças, visto que a resistência à abrasão e impacto do ABS é inferior à do aço, exigindo o uso de espátulas plásticas ou lavagem cuidadosa para evitar danos à superfície interna do molde e garantir sua reutilização.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos ao longo do estudo permitiram avaliar de forma quantitativa e qualitativa o desempenho dos moldes impressos em 3D por FDM com filamento ABS em comparação aos moldes metálicos tradicionais, considerando os critérios de resistência, precisão dimensional, estanqueidade, custo e viabilidade prática.

Neste Capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos ao longo do estudo, permitindo uma avaliação quantitativa e qualitativa do desempenho dos moldes impressos em 3D por FDM com filamento ABS em comparação aos moldes metálicos tradicionais. A análise considera os critérios de desempenho físico, custo, eficiência e integridade estrutural. O Capítulo está dividido em:

- 4.1 Desempenho Físico e Funcional dos Moldes
- 4.2 Comparação de Custos e Eficiência Produtiva
- 4.3 Análise da Resistência e Reuso

4.1. DESEMPENHO FÍSICO E FUNCIONAL DOS MOLDES

A validação inicial da viabilidade técnica dos moldes impressos reside na sua capacidade de atender aos requisitos físicos e funcionais imediatos, como estanqueidade, precisão dimensional e integridade estrutural durante a concretagem. Esta seção expõe os resultados referentes a esse desempenho fundamental, confrontando-o com os parâmetros estabelecidos pela normativa e com o desempenho dos moldes metálicos.

Os moldes impressos apresentaram comportamento excelente quanto à estanqueidade, não sendo observados vazamentos de pasta de cimento durante a concretagem. O encaixe das partes impressas, reforçado pelos pinos e travas, proporcionou fechamento firme e vedação eficiente.

Após o processo de cura, os moldes não apresentaram deformações, trincas ou desgaste, sendo possível reutilizá-los sem necessidade de manutenção, como demonstrado na Figura 12. Esse desempenho confirma a viabilidade do ABS como material de uso técnico para ensaios laboratoriais de curta duração.

Figura 12 - Moldes após a concretagem e desmoldagem



Fonte: Autoria própria, 2025.

Em termos dimensionais, verificou-se que as alturas dos corpos de prova moldados em ABS apresentaram variação inferior, ou muito próxima à dos moldes metálicos, indicando maior precisão geométrica. Essa diferença pode estar associada à maior regularidade superficial do molde impresso e à ausência de deformações por impacto ou oxidação, comuns nos moldes metálicos mais antigos, como demonstrado na Tabela 5.

Tabela 5 - Comparativo das variações dimensionais médias entre corpos de prova moldados em ABS (impressos) e metálicos.

PARÂMETRO GEOMÉTRICO	TIPO DE MOLDE	MÉDIA (MM)	DESVIO PADRÃO (MM)	AMPLITUDE (MM)	COEFICIENTE DE VARIAÇÃO (%CV)
DIÂMETRO (D)	Metálico	75,53	0,33	1,85	0,44
	Impresso (ABS)	75,42	0,33	1,48	0,43
ALTURA (H)	Metálico	146,96	1,14	3,22	0,78
	Impresso (ABS)	150,86	0,69	2,42	0,46

Fonte: Autoria própria, 2025.

Os resultados indicam que os corpos de prova moldados em ABS apresentaram maior uniformidade dimensional, com coeficiente de variação inferior ao obtido nos moldes metálicos tanto em diâmetro quanto em altura. Essa consistência pode ser atribuída à reprodutibilidade geométrica da manufatura aditiva FDM, que permite tolerâncias menores entre peças, em

contraste com o desgaste mecânico e pequenas deformações observadas em moldes metálicos utilizados repetidamente.

A conformidade dimensional dos corpos de prova é um requisito crítico para a confiabilidade dos ensaios de compressão. A ABNT NBR 5738:2015 estabelece, em seu item 4.1.1.1, tolerâncias máximas admissíveis de 1% para o diâmetro e 2% para a altura dos moldes cilíndricos. Para o corpo de prova de 75 x 150 mm adotado, isso equivale a variações permitidas de $\pm 0,75$ mm no diâmetro e $\pm 3,0$ mm na altura.

Os resultados obtidos, consolidados na Tabela 5, demonstram um desempenho excepcional dos moldes impressos. As variações dimensionais médias observadas nos corpos de prova moldados em ABS foram de apenas 0,43% para o diâmetro e 0,46% para a altura. Estes valores não apenas estão bem dentro das tolerâncias normativas, como representam uma fração mínima do limite permitido.

Mais notável ainda é a superioridade dimensional dos moldes impressos em relação aos metálicos disponíveis no laboratório. Enquanto os moldes de ABS apresentaram um coeficiente de variação (CV) de 0,43% (diâmetro) e 0,46% (altura), os moldes metálicos, possivelmente devido ao desgaste por uso prolongado, exibiram uma variabilidade significativamente maior, com CV de 0,44% para o diâmetro e 0,78% para a altura. Este resultado evidencia que a manufatura aditiva FDM, quando parametrizada corretamente, é capaz de produzir moldes com uma precisão geométrica e uma reprodutibilidade superiores às de equipamentos metálicos convencionais em estado de uso, garantindo um base mais confiável e uniforme para a moldagem de corpos de prova para ensaios de engenharia.

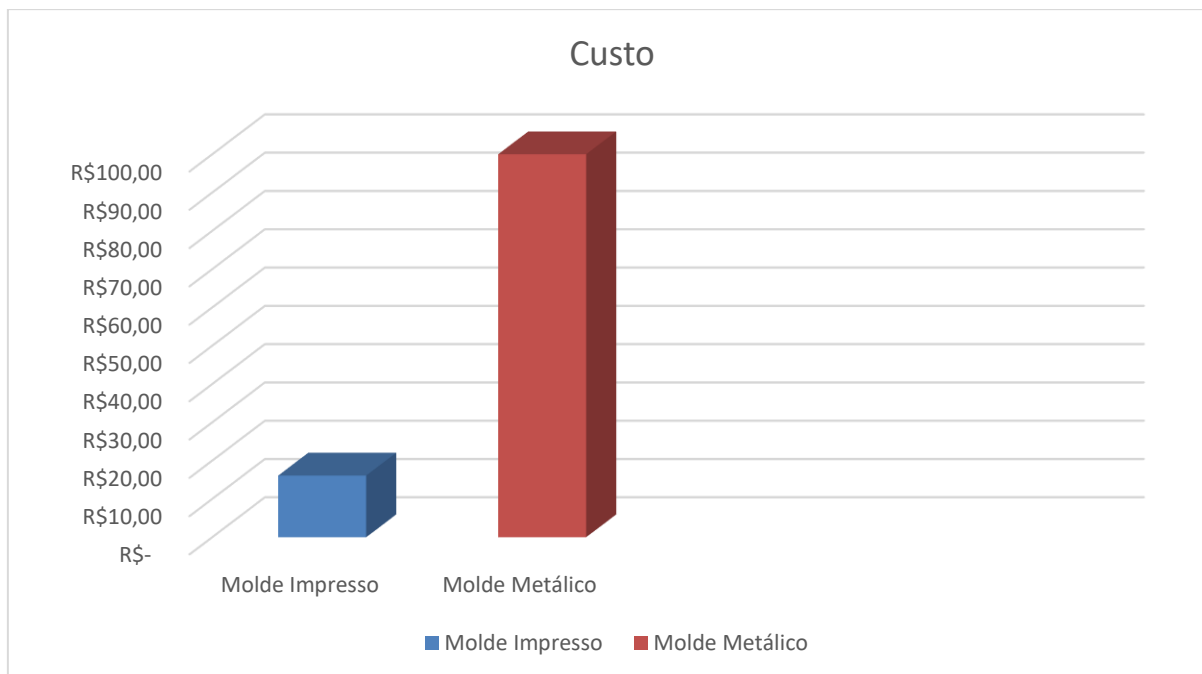
4.2. COMPARAÇÃO DE CUSTOS E EFICIÊNCIA PRODUTIVA

Para além do desempenho físico, a análise econômica e operacional constitui um pilar fundamental para validar a viabilidade de uma nova tecnologia. Nesta seção, são apresentados e discutidos os dados comparativos de custos e os ganhos estratégicos associados à fabricação digital de moldes, contrastando-os com o paradigma tradicional de aquisição de moldes metálicos.

Em relação ao custo, a impressão 3D apresentou vantagens econômicas expressivas. O custo total de material para um molde impresso completo em ABS foi de R\$ 16,10 (conforme a Tabela 3), baseado em uma massa total de 150,7 g de filamento. Em contrapartida, o custo de um molde metálico comercial normatizado de 75 x 150 mm é, utilizando como base uma média

de preços dos itens disponíveis a venda no *E-commerce*, superior a R\$ 100,00¹, sem considerar o frete ou tempo de aquisição para instituições públicas.

Gráfico 1 - Comparativo de custos entre molde metálico e molde impresso 3D.



Fonte: Autoria própria, 2025.

Além da economia direta, a fabricação digital elimina a dependência de fornecedores e prazos de licitação, o que representa um ganho logístico relevante para instituições públicas e laboratórios acadêmicos. O tempo total de impressão, de cerca de 16 horas, permite a produção de moldes sob demanda, inclusive em locais com recursos limitados, desde que haja acesso a uma impressora 3D capaz de imprimir com ABS.

Além da vantagem financeira direta, a adoção da manufatura aditiva proporciona benefícios estratégicos para a gestão laboratorial. Primeiramente, destaca-se a possibilidade de redução de estoque físico; como os moldes podem ser impressos sob demanda (*on-demand*), elimina-se a necessidade de armazenar grandes quantidades de itens ociosos, otimizando o espaço físico. A tecnologia também oferece escalabilidade flexível, permitindo que a capacidade produtiva seja ampliada em períodos de maior demanda pela simples adição de mais impressoras ou pela distribuição dos arquivos digitais entre diferentes unidades da instituição.

Outro ponto crucial é a facilidade de customização e manutenção. A tecnologia FDM permite desenvolver moldes com geometrias especiais para pesquisas não padronizadas sem a dependência de ferramentarias industriais. Em caso de avarias, a manutenibilidade é facilitada

¹ Média de preços consultada na plataforma Mercado Livre em dezembro de 2025, para moldes cilíndricos em aço.

pela possibilidade de reimprimir apenas o componente danificado (como uma trava ou base) por um custo irrisório, assegurando a continuidade das atividades sem interrupções. Por fim, a documentação digital do projeto favorece a reprodutibilidade científica, permitindo que o modelo open source seja compartilhado e replicado em qualquer laboratório, descentralizando o acesso a equipamentos de ensaio e fortalecendo a confiabilidade dos resultados por meio da padronização digital.

4.3. ANÁLISE DA RESISTÊNCIA E REUSO

A confiabilidade do método proposto é atestada não apenas pela precisão dimensional, mas também pela sua capacidade de produzir corpos de prova estruturalmente íntegros e pela durabilidade dos moldes. Esta seção aborda os resultados dos ensaios de compressão e a avaliação do potencial de reuso dos moldes impressos, elementos cruciais para sua adoção em rotinas laboratoriais.

Durante os ensaios, os corpos de prova apresentaram comportamento mecânico consistente. As resistências à compressão, calculadas com base nas cargas de ruptura e nas dimensões médias, oscilaram entre 3,8 MPa e 11,6 MPa, dependendo da idade de ensaio e das condições de cura, conforme detalhado na Tabela 6.

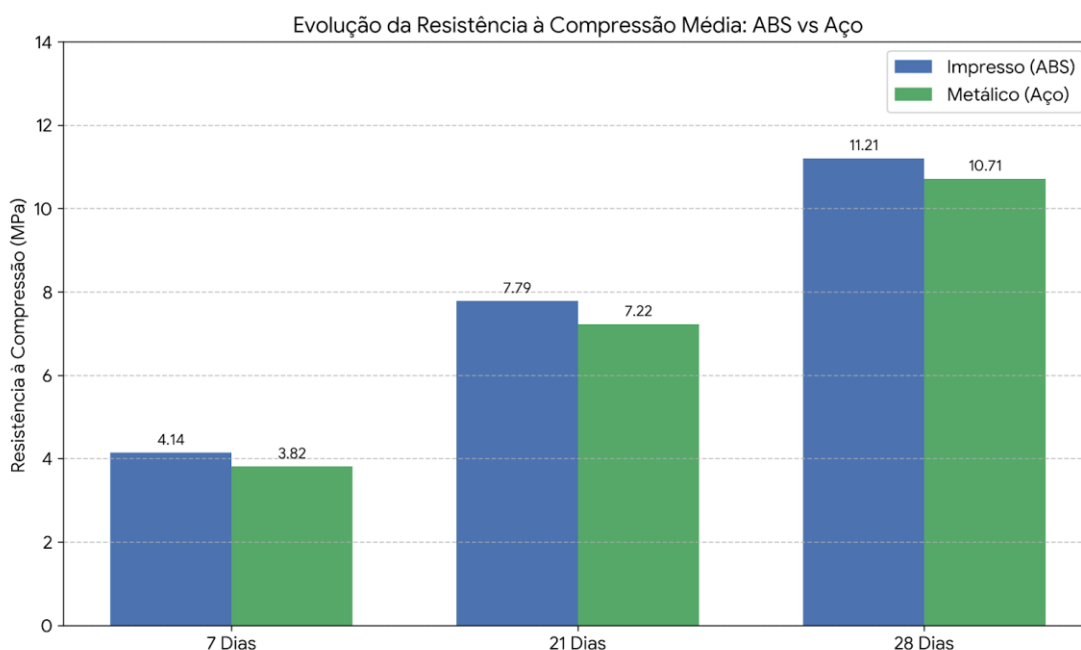
Tabela 6 - Resultados médios de resistência e dimensões dos corpos de prova IM (impressos) e de aço (NO).

<i>Amostra</i>	<i>Tipo de Molde</i>	<i>Idade (dias)</i>	<i>Diâmetro Médio (mm)</i>	<i>Altura Média (mm)</i>	<i>Carga Máxima (kN)</i>	<i>Resistência à Compressão (MPa)</i>	<i>Modo de Ruptura</i>
IM01	Impresso (ABS)	7	75,52	151,42	19,2	4,29	Cisalhada
IM02	Impresso (ABS)	7	75,25	150,57	17,8	4	Cônica
NO01	Metálico	7	75,52	148,68	17,1	3,82	Cônica
NO02	Metálico	21	75,67	145,68	32,5	7,23	Cisalhada
NO03	Metálico	21	75,68	148,1	32,5	7,22	Cônica
IM03	Impresso (ABS)	21	75,43	150,5	36,6	8,19	Cônica
IM04	Impresso (ABS)	21	75,33	150,88	32,9	7,38	Cônica
NO04	Metálico	28	75,4	146,7	51,1	11,44	Cônica
NO05	Metálico	28	75,35	146,65	44,5	9,98	Cisalhada
IM05	Impresso (ABS)	28	75,85	149,48	48,7	10,78	Cônica
IM06	Impresso (ABS)	28	74,87	150,52	51,2	11,63	Cônica

Fonte: Autoria própria, 2025.

Para uma compreensão mais clara do desempenho relativo entre as duas tecnologias de moldagem, o Gráfico 2 apresenta a evolução das resistências médias obtidas em cada idade de controle.

Gráfico 2 - Comparativo de Resistência.



Fonte: Autoria própria, 2025.

4.3.1. Superioridade na Resistência Média e Estanqueidade

Ao contrário da hipótese inicial de que os moldes plásticos poderiam ter um desempenho apenas "equivalente", os dados mostram que os corpos de prova moldados em ABS (IM) apresentaram resistências médias sistematicamente superiores às do grupo metálico (NO) em todas as idades testadas.

Aos 28 dias, a média de resistência do grupo Impresso foi de 11,21 MPa, superando em 4,6% a média do grupo Metálico (10,71 MPa). Esse ganho de desempenho pode ser atribuído diretamente à estanqueidade superior dos moldes impressos. Durante a moldagem, a vedação precisa das juntas do molde de ABS impediu a perda de nata de cimento, um problema recorrente em moldes metálicos com desgaste pelo uso contínuo. A retenção integral da água de amassamento favoreceu uma hidratação mais eficiente do cimento, resultando em uma

matriz cimentícia potencialmente mais densa e resistente.

4.3.2. Consistência e Confiabilidade Experimental

A dispersão dos resultados na idade crítica de 28 dias evidencia a maior confiabilidade proporcionada pela manufatura aditiva. Os corpos de prova do grupo Impresso apresentaram valores de resistência muito próximos entre si (10,78 MPa e 11,63 MPa), indicando alta reprodutibilidade do processo.

Em contraste, o grupo Metálico exibiu maior variabilidade, com um dos corpos de prova (NO05) registrando o menor valor do período (9,98 MPa). Essa inconsistência no grupo de controle sugere que as imperfeições geométricas dos moldes de aço antigos podem estar introduzindo variáveis não controladas no ensaio, penalizando a resistência aparente do concreto.

4.3.3. Qualidade Geométrica e Modos de Ruptura

A análise qualitativa dos modos de ruptura reforça a superioridade geométrica dos moldes impressos. De acordo com a NBR 5739, a ruptura do tipo "Cônica" (Tipo A) é classificada como um padrão satisfatório. Neville (2016) fundamenta a preferência por este modo de falha explicando que a geometria cônica resulta do atrito entre os pratos da prensa e as bases do corpo de prova, o que restringe a expansão lateral e cria um estado de tensão triaxial nas extremidades.

A predominância desse padrão atesta, portanto, que o rompimento foi regido pela resistência intrínseca do material sob condições ideais de centralização e geometria, livre de concentrações de tensão espúrias causadas por defeitos no capeamento ou nas faces de apoio.

Sob essa ótica, os resultados são elucidativos:

- No grupo Impresso (ABS), 83% das amostras apresentaram a ruptura Cônica ideal descrita por Neville.
- No grupo Metálico, apenas 60% atingiram esse padrão, com 40% das amostras apresentando ruptura "Cisalhada".

A incidência significativa de rupturas cisalhadas nos moldes metálicos é um forte

indicativo de desvios de perpendicularidade ou planeza nas faces dos corpos de prova moldados. Tais defeitos, transferidos do molde desgastado para o concreto, foram minimizados pela precisão digital da impressão 3D. Portanto, conclui-se que o molde em ABS não apenas substitui o metálico, mas, no contexto deste estudo, ofereceu um controle tecnológico mais rigoroso e confiável.

4.4. ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA E RETORNO SOBRE O INVESTIMENTO (ROI)

Para consolidar a proposta de substituição tecnológica, foi realizada uma análise financeira detalhada considerando a aquisição de uma impressora 3D fechada (compatível com ABS) em comparação à compra direta de moldes metálicos convencionais.

Para este levantamento, tomou-se como base o preço de uma impressora 3D modelo Creality CR-200B (ou similar com câmara fechada), cotada em R\$ 2.899,00 em consulta realizada na plataforma Mercado Livre em 18 de dezembro de 2025. O cenário comparativo considera a necessidade de equipar um laboratório com um lote de moldes, confrontando o Custo de Aquisição (CAPEX) e o Custo Operacional (OPEX).

4.4.1 Parâmetros de Custo e Manutenção

A composição do custo do molde impresso, anteriormente calculada em R\$ 16,10, refere-se aos insumos diretos (filamento e energia). No entanto, para uma análise de orçamento real, foi adicionada uma margem de segurança de 15% para cobrir custos de manutenção preventiva (troca de bicos, lubrificação), depreciação acelerada de componentes móveis e eventuais falhas de impressão (perda de material).

Para o molde metálico, adotou-se o valor médio de mercado de R\$ 115,00 por unidade (referência de dezembro de 2025), considerando o preço do produto somado ao frete médio para o sertão pernambucano. A Tabela 7 detalha os parâmetros adotados.

Tabela 7 - Parâmetros para cálculo do Ponto de Equilíbrio (Break-even).

Parâmetro	Valor	Descrição
Investimento Inicial (Impressora)	R\$2.899,00	Cotação Mercado Livre (18/12/2025).
Custo Molde Metálico (Unid.)	R\$115,00	Preço médio de mercado + Frete.

Custo Insumos Molde ABS (Unid.)	R\$16,10	Filamento + Energia.
Margem de Manutenção/Depreciação	R\$2,41	15% sobre o custo dos insumos.
Custo Final Molde ABS (Unid.)	R\$18,51	Custo Real de Produção.
Economia por Unidade Produzida	R\$96,49	Diferença entre Metal e ABS.

Fonte: Autoria própria. 2025.

4.4.2. Cálculo do Payback (Tempo de Retorno)

O *Payback* simples, ou ponto de equilíbrio, indica quantos moldes precisam ser fabricados para que a economia gerada pague integralmente o custo da impressora.

$$\text{Payback} = \frac{\text{Investimento Inicial}}{\text{Economia por Unidade}} = \frac{2899,00}{96,49} \cong 30,04$$

O cálculo demonstra que, ao produzir apenas 30 moldes, o investimento na impressora é totalmente recuperado. A partir da 31ª unidade, cada molde produzido representa uma economia líquida de R\$ 96,49 para o laboratório em relação à compra do equivalente metálico.

4.4.3. Análise Temporal de Produção

Considerando o tempo de impressão de aproximadamente 16 horas por molde completo (corpo, base e travas), o tempo necessário para atingir o retorno do investimento depende do regime de operação do equipamento:

- **Regime Intensivo (24h/dia):** A produção dos 30 moldes levaria cerca de 20 dias ininterruptos.
- **Regime Laboratorial (8h/dia):** Considerando o funcionamento apenas em horário comercial, o retorno ocorreria em aproximadamente 60 dias úteis (cerca de 3 meses).

4.4.4. Considerações sobre Depreciação do Equipamento

Mesmo considerando uma depreciação contábil da impressora ao longo de 5 anos (taxa usual para equipamentos de informática e eletrônicos), o *payback* extremamente curto (menos

de 3 meses em regime laboratorial) dilui o impacto da desvalorização do ativo. Ao final do primeiro ano, o equipamento não apenas se paga, como permite a expansão do acervo do laboratório com um custo marginal irrisório, validando a aquisição sob a ótica da eficiência orçamentária pública.

5. CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho teve como objetivo principal analisar a viabilidade técnica e econômica da fabricação de moldes para corpos de prova de concreto utilizando a impressão 3D FDM com filamento ABS, em conformidade com os parâmetros estabelecidos pela ABNT NBR 5738. A pesquisa comprovou que a tecnologia de manufatura aditiva é uma alternativa plenamente capaz de substituir, com vantagens específicas, os moldes metálicos tradicionais em aplicações laboratoriais e de ensino.

Quanto aos resultados técnicos, os moldes impressos atenderam rigorosamente às exigências da norma. Apresentaram excelente estanqueidade, sem vazamentos de pasta de cimento, atendendo ao item 4.1.3.2 da NBR 5738, e demonstraram uma precisão dimensional superior à dos moldes metálicos desgastados disponíveis no laboratório, com variações dentro das tolerâncias permitidas. Os ensaios de compressão, executados conforme a ABNT NBR 5739, validaram que o uso do molde em ABS não interfere nos resultados de resistência do concreto, apresentando modos de ruptura normais e compatíveis.

No aspecto econômico, a viabilidade foi confirmada de forma expressiva. O custo de material de R\$ 16,10 por molde representa uma redução de cerca de 85% em comparação aos modelos comerciais metálicos encontrados. Essa economia, aliada à independência de processos licitatórios demorados e à logística de frete, posiciona a impressão 3D como uma ferramenta estratégica para a autonomia de laboratórios em instituições públicas.

Mais do que a economia financeira, os resultados obtidos permitem extrapolar benefícios significativos para a rotina laboratorial. O comportamento previsível dos corpos de prova, com modos de ruptura (cônicos e cisalhados) plenamente compatíveis com a norma, atesta que o uso do molde de ABS não introduz variáveis adversas no ensaio. A alta reprodutibilidade dimensional contribui para uma menor variabilidade experimental, aumentando a confiabilidade dos resultados. Além disso, a facilidade de reposição a um custo irrisório garante a continuidade das atividades sem interrupções e permite a adaptação ágil para novos padrões ou geometrias, assegurando que o laboratório possa se manter atualizado com baixíssimo investimento.

Entretanto, o estudo identificou limitações operacionais. O tempo de fabricação de aproximadamente 16 horas por molde restringe a produção em massa imediata. Adicionalmente, a menor dureza superficial do ABS em relação ao aço exige cuidados específicos. Embora os resultados iniciais indiquem um alto potencial de reuso, este fica

condicionado à observância de boas práticas de manuseio, como a aplicação correta de desmoldantes, limpeza com solventes neutros e armazenamento em ambiente seco para preservar a integridade geométrica das peças.

Para trabalhos futuros, recomenda-se a realização de estudos de ciclo de vida estendido para determinar a vida útil efetiva dos moldes impressos em ciclos repetidos de concretagem. Sugere-se também a investigação comparativa do desempenho de diferentes polímeros de engenharia, como o PETG ou ASA, em condições laboratoriais equivalentes, bem como a análise do comportamento térmico do molde diante de concretos com alto calor de hidratação.

Conclui-se, portanto, que a integração da manufatura aditiva na construção civil, exemplificada neste trabalho, não é apenas uma possibilidade teórica, mas uma solução prática, acessível e normativamente conforme, que democratiza o acesso a ferramentas de engenharia, otimiza recursos e fomenta a inovação no ambiente acadêmico e profissional.

REFERÊNCIAS

- 3D LAB. **Imprimir com ABS em impressora aberta: é possível?! 2020.** Disponível em: <https://3dlab.com.br/imprimir-com-abs-em-impressora-aberta/>. Acesso em: 30 de Novembro de 2025.
- ANDRADE, A. L. de *et al.* Avaliação de peças impressas de ABS e PETG-CF via Fabricação de Filamento Fundido para aplicação em Transformadores. 2025.
- ASHBY, M. F. Material profiles. *In*: ASHBY, M. F. **Materials and the Environment**. 2. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2013. cap. 15, p. 459-595. DOI: 10.1016/B978-0-12-385971-6.00015-4.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12655**: Concreto de cimento Portland: preparo, controle e recebimento. Rio de Janeiro, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5738**: Concreto: procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5739**: Concreto: ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 9833**: Concreto endurecido: determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2008.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO/IEC 17025**: Requisitos gerais para competência de laboratórios de ensaio e calibração. Rio de Janeiro, 2017.
- AZEEM, M. *et al.* Influence of winding angles on hoop stress in composite pressure vessels: Finite element analysis. **Results in Engineering**, v. 21, e101667, 2024. DOI: 10.1016/j.rineng.2023.101667.
- BEHNOOD, A.; TITTELBOOM, K. Van; BELIE, N. De. Methods for measuring pH in concrete: A review. **Construction and Building Materials**, v. 105, p. 176-188, 2016.
- BRANCO, Abílio de Azevedo Caldas. **Concreto**: Traços - Fabricação. Rio de Janeiro: [s. n.], [s. d.]. (Série Divulgação, Monografia n.º 19).
- CARASEK, H. *et al.* Impressão 3D de materiais cimentícios: influência da aderência entre camadas nas propriedades mecânicas e na durabilidade. **Revista Concreto IBRACON**, 2021. DOI: 10.4322/1809-7197.2021.103.0001.
- CARBONARI, L. *et al.* Impressão 3D com materiais cimentícios: uma análise comparativa de projetos residenciais. **Mix Sustentável**, v. 9, n. 4, p. 27-39, 2023.
- CARNEIRO, L. R. *et al.* Influência da temperatura da mesa de impressão 3D na dureza e dimensões geométricas de amostras em ABS. *In*: CONGRESSO NACIONAL DE ESTUDANTES DE ENGENHARIA MECÂNICA, 26., 2019. **Anais [...]**. [S. l.: s. n.], 2019.

CONCRETO & CONSTRUÇÕES. São Paulo: IBRACON, 2009. Disponível em: http://ibracon.org.br/publicacoes/revistas_ibracon/rev_construcao/pdf/revista_concreto_53.pdf. Acesso em: 30 de Novembro de 2025.

CRAVEIRO, F. *et al.* Additive manufacturing as an enabling technology for digital construction: A perspective on Construction 4.0. **Automation in Construction**, v. 103, p. 251-267, 2019.

CREALITY. **3D Printer User Manual: CR-200B**. Versão 2.0. Shenzhen: Shenzhen Creality 3D Technology Co., [s. d.].

DE FREITAS CUNHA, P. M. **Impressão 3D de Estruturas Híbridas**. 2019. Dissertação (Mestrado) – Universidade do Minho, [Braga], 2019.

ENGINEERING PRODUCT DESIGN. **What is Additive Manufacturing?** 2024. Disponível em: <https://engineeringproductdesign.com/knowledge-base/additive-manufacturing-processes/>. Acesso em: 30 de Novembro de 2025.

GALLIO, L. C. Comparação de custos para construção em alvenaria estrutural e impressão 3D. 2024.

GHIASSI, B.; DE BRITO, J. Measurement techniques and instrumentation for concrete characterization. **Journal of Building Engineering**, v. 32, p. 101–118, 2020.

GOLUBOVIĆ, Z. *et al.* A comprehensive mechanical examination of ABS and ABS-like polymers additively manufactured by material extrusion and vat photopolymerization processes. **Polymers**, v. 15, n. 21, p. 4197, 2023.

GOMES, A. P. G. *et al.* Comparative study of biocompatibility after surface treatment with kINPen IND plasma on Acrylonitrile Butadiene Styrene-ABS samples. **The Academic Society Journal**, v. 7, n. 3, p. 95-101, 2023. DOI: doi.org/10.32640/tasj.2023.3.95.

GTMAX3D. **Filamento ABS Premium GTMax3D 1,75 mm – 1 kg – várias cores**. [S. l.], [s. d.]. Disponível em: <https://www.gtmax3d.com.br/filamento-abs-premium-175mm-gtmax3d-varias-cores>. Acesso em: 30 de Novembro de 2025.

KUREK, A. P. *et al.* Modificação da superfície de peças em PVC e blendas PVC/ABS para adesão de camadas metálicas. 2014.

LUPING, T.; NILSSON, L. O. Accuracy of dimensional measurements and their influence on compressive strength of concrete specimens. **Cement and Concrete Research**, v. 149, p. 106–118, 2021.

MARTINEZ, A. C. P. *et al.* Avaliação do comportamento mecânico dos polímeros ABS e PLA em impressão 3D. **Gestão & Tecnologia de Projetos**, v. 14, n. 1, p. 125-141, 2019.

MAZLAN, M. A. *et al.* Effects of infill density, wall perimeter and layer height in fabricating 3D printing products. **Materials**, v. 16, n. 2, p. 695, 2023.

MAZONI, I.; DOS SANTOS, A. T. Comparação de materiais na engenharia civil. **Caderno Progressus**, v. 4, n. 8, p. 107-122, 2024.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

MOREIRA, R. Conceção de um sistema de medição sem contacto da temperatura do polímero à saída do bico de uma impressora 3D FDM. 2016.

NARAYANAN, R. Mechanical behavior of concrete cylinders: size effect and statistical variability. **Construction and Building Materials**, v. 392, p. 1–14, 2024.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.

ORTIZ-DOMÍNGUEZ, M. *et al.* Determinación del módulo de Young. **Ingenio y Conciencia**, v. 9, n. 17, p. 52-63, 2020.

PORTELA, S. **Warping**. 3D Lab, 2021. Disponível em: <https://3dlab.com.br/tag/warping/>. Acesso em: 30 de Novembro de 2025.

PORTO, Thomás Monteiro Sobrino. **Estudo dos avanços da tecnologia de impressão 3D e da sua aplicação na construção civil**. 2016. Projeto de Graduação (Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

QUEIROZ JUNIOR, Cleanto Carlos de. **A utilização da impressão 3D na construção civil**. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2024.

RAMIAN, J.; RAMIAN, J.; DZIOB, D. Thermal deformations of thermoplast during 3D printing: Warping in the case of ABS. **Materials**, v. 14, n. 22, 7070, 2021.

REGIS, D. M. *et al.* Influência da radiação ultravioleta nas propriedades térmicas e mecânicas do ABS com e sem aditivo anti-UV. 2023.

REIS, A. *et al.* **Análise de estratégias de impressão 3D por método FDM**. 2021. Repositório RUNA. Disponível em: <https://repositorio.animaeducacao.com.br/handle/ANIMA/26632>. Acesso em: 30 de Novembro de 2025.

SANTANA, L. *et al.* Estudo comparativo entre PETG e PLA para impressão 3D. **Matéria**, v. 23, n. 4, e12267, 2018.

SANTOS, J. V. V. dos. Análise da influência das variáveis de fabricação em peças de PETG fabricadas via FDM. 2023.

SHIMANO, H.; OKAMOTO, T.; HARADA, M. Influência do percentual de preenchimento no comportamento mecânico de peças em PLA e ABS obtidas por impressão 3D. **Revista Brasileira de Ciência, Tecnologia e Inovação**, v. 3, n. 2, p. 178-190, 2018.

SHIMANO, M. M. *et al.* Influence of curing temperature and testing procedures on

compressive strength of concrete. **Materials and Structures**, v. 51, n. 115, p. 1–13, 2018.

ZIER, A. F. *et al.* Estudo da prototipagem rápida por impressão 3D e seu efeito na redução de custos e prazos. **Memorial TCC Caderno da Graduação**, v. 5, n. 1, p. 301-318, 2019.