

# AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DOS POLÍMEROS ABS E PLA EM IMPRESSÃO 3D VISANDO SIMULAÇÃO DE DESEMPENHO ESTRUTURAL

Evaluation of mechanical behavior of ABS and PLA polymers in 3D printing for structural performance simulation

Andressa C. P. Martinez<sup>1</sup>, Douglas L. de Souza<sup>1</sup>, Denise M. dos Santos<sup>1</sup>, Leonardo G. Pedroti<sup>1</sup>, Joyce C. Carlo<sup>1</sup>, Marianna A. D. Martins<sup>1</sup>

**RESUMO:** Aplicações na Arquitetura, Engenharia e Construção estão ampliando o interesse da impressão 3D. No entanto, limitações da produção, dentre as quais inclui-se a performance estrutural, ainda impedem o uso significativo desta tecnologia. Neste sentido, este artigo apresenta parte da pesquisa de simulação e otimização estrutural e objetiva estudar o comportamento mecânico de polímeros ABS e PLA, sob a forma de filamentos termoplásticos, comumente utilizados em impressoras 3D de baixo custo. Ele apresenta os resultados preliminares de avaliação do comportamento mecânico do ABS e PLA, segundo as normas ASTM E2954 e ASTM D790, que estabelecem métodos para testes de compressão axial e flexão de três pontos para matriz plástica e polimérica. A partir dos ensaios destrutivos dos modelos físicos, vislumbra-se a criação de modelos numéricos estruturais, e a definição de novos algoritmos e componentes no *Grasshopper*, que facilitem a simulação computacional e otimização estrutural de peças, bem como a maior precisão de seu comportamento mecânico pós-produção.

**PALAVRAS-CHAVE:** Impressão 3D; Performance estrutural; Prototipagem rápida; Simulação computacional.

<sup>1</sup> Universidade Federal de Viçosa - UFV

**ABSTRACT:** Applications in Architecture, Engineering and Construction are amplifying the interest of 3D printing. However, some manufacturing limitations, such as structural performance, still prevent the significant use of this technology. In this sense, this paper presents part of the research on simulation of structural performance, which aims to study the mechanical behavior of polymers ABS and PLA in the form of thermoplastic filaments (FDM- Fused Deposition Modelling), commonly used in affordable 3D printers. It presents the preliminary results for the evaluation of the mechanical behavior of ABS and PLA in the light of ASTM E2954 and ASTM D790 standards, which establish test methods for axial compression and three-point flexure for plastic and polymer matrix. Through destructive physical analysis, this research aims to create structural numerical models, algorithms and components in *Grasshopper*, which will be able to facilitate computational simulation and structural optimization of parts, as well the greater precision of its post fabrication mechanical behavior.

**KEYWORDS:** 3D printing; Structural performance; Rapid prototyping; Computational simulation.

## How to cite this article:

MARTINEZ, A. C. P.; SOUZA, D. L.; SANTOS, D. M.; PEDROTI, L. G.; CARLO, J. C.; MARTINS, M. A. D. Avaliação do comportamento mecânico dos polímeros ABS e PLA em impressão 3D visando simulação de desempenho estrutural. *Gestão e Tecnologia de Projetos*, São Carlos, v.14, n.1, p.125-141, set.2019. <http://dx.doi.org/10.11606/gtp.v14i1.148289>

**Fonte de financiamento:** CNPQ e CAPES

**Conflito de interesse:**

Declara não haver

**Submetido em:** 17/07/2018

**Aceito em:** 21/02/2019



## INTRODUÇÃO

Segundo Haesuler et al. (2017), técnicas e materiais de manufatura aditiva estão evoluindo rapidamente na última década. Aplicações na Arquitetura, Engenharia e Construção estão ampliando o interesse da impressão 3D. No entanto, o custo do material, aliados a limitações da produção e dimensões dos modelos, bem como a performance estrutural (HAEUSLER et al., 2017; DRITSAS; CHEN; SASS, 2017; MATSON; SWEET, 2016 e CROLLA; WILLIAMS, 2014), ainda impedem o impacto significativo da aplicação da tecnologia de impressão 3D na produção de componentes de edificações.

De um modo geral, o uso da manufatura aditiva em Arquitetura e Engenharia, conhecida como impressão 3D, limita-se comumente à criação de modelos físicos com o propósito apenas representacional (RASPALL; BANÓN, 2016), devido à relativa baixa resistência das partes impressas em 3D. Neste sentido, esta investigação reúne pesquisadores dos campos de Arquitetura e Urbanismo e Engenharia Civil, com ênfase em projeto estrutural, e propõe-se a investigar a modelagem digital e a simulação de desempenho estrutural de componentes com geometrias complexas, produzidos a partir de impressoras 3D com filamentos aquecidos. O presente artigo apresenta os primeiros resultados dos ensaios destrutivos de diferentes corpos de prova, com o objetivo de conhecer o comportamento mecânico dos polímeros ABS<sup>1</sup> e PLA<sup>2</sup>, sob a forma de filamentos termoplásticos, comumente utilizados em impressoras 3D de baixo custo.

Segundo Divyathej, Varun e Rajeev (2016), a técnica de impressão com filamentos termoplásticos considerada neste trabalho, também conhecida como FDM (Fused Deposition Modeling), funciona a partir de um bico de extrusão, com aquecedores resistivos que derretem o plástico, expulsando-o para impressão de seções transversais do objeto, consecutivamente, até a finalização do modelo. A tecnologia de impressão por polímeros termoplásticos também cria um suporte para o modelo, que pode ser posteriormente dissolvido em diferentes tipos de soluções ou separado mecanicamente do objeto final. O controle da seção transversal para impressão, a espessura das camadas, densidade, dentre outros fatores, podem ser configurados em diferentes *software* para fatiamento da geometria.

Segundo Divyathej, Varun e Rajeev (2016), a qualidade da impressão 3D depende de diferentes fatores, como a espessura das camadas, orientação, o suporte e temperatura de impressão, bem como diferenças entre equipamentos. Cada um dos fatores influencia o processo completo de impressão 3D, e ainda devem ser confrontados com a fase de preparação do modelo, impressão e fase de pós impressão.

Adicionalmente, apesar de diferentes *software*, como o *Rhinoceros* e sua interação com o *Grasshopper*, constituir ambientes de simulação a partir de *plugins* de avaliação de desempenho estrutural como *Karamba*, *Millipede*, *Kangaroo*, *Scan&Solve<sup>TM</sup>*, dentre outros (HAEUSLER et al., 2017; CROLLA et al., 2017; MATSON; SWEET, 2016), ainda são necessários testes adequados para a compreensão do desempenho estrutural dos polímeros ABS e PLA sob a forma de filamentos aquecidos.

Neste sentido, esta fase da pesquisa visa lançar luz sobre este tema e auxiliar na validação de valores pré-existentes em *plugins* de simulação (como o ABS no *Scan&Solve<sup>TM</sup>*) ou auxiliar na inserção e ponderação das propriedades de resistência dos materiais utilizados nas impressoras de baixo custo mais comuns nos laboratórios de prototipagem e fabricação digital. Além do limitado conhecimento sobre o comportamento mecânico dos materiais poliméricos para manufatura aditiva, esta pesquisa parte também da hipótese inicial que as limitações de controle de qualidade, acurácia dos modelos finais, bem como acabamento e velocidade de impressão, inerentes aos diferentes modelos de impressoras 3D, também afetam o desempenho

1 A sigla ABS (*Acrylonitrile Butadiene Styrene*) significa Acrilonitrila Butadieno Estireno, em português. Trata-se de um copolímero termoplástico sintético, rígido e leve, derivado do petróleo, com facilidade de moldagem por injeção, extrusão, sopro e conformação ao calor. Permite adição de pigmentos, é reciclável e também possui propriedades de isolante elétrico.

2 A sigla PLA (*polylactic acid*) significa Poliláctido láctico ou ácido poliláctico, em português. Trata-se de um polímero termoplástico, constituído por moléculas de ácido láctico, biodegradável e reciclável.

estrutural dos protótipos, e estes dados serão confrontados e ponderados ao final da investigação.

De fato, segundo Haeusler et al. (2017), em uma escala de produção mais ampla, antes da introdução da manufatura aditiva em escala industrial ou no processo de construção, testes adequados de materiais, ensaios estruturais, códigos e normas, precisam ser revistos. No entanto, as limitações atuais não reduzem o potencial para o desenvolvimento e aprimoramento futuro da tecnologia (NABONI; PAOLETTI, 2015).

Neste sentido, este artigo visa apresentar os resultados preliminares da avaliação do comportamento mecânico dos corpos de prova de material polimérico ABS e PLA, impressos por uma impressora 3D, submetidos a esforços de compressão axial e flexão, à luz das normas ASTM E2954 (ASTM E2954-15..., 2015) e ASTM D790 (ASTM D790-17..., 2017) que estabelecem parâmetros para execução de ensaios de polímeros à compressão axial e à flexão em três pontos, respectivamente.

## METODOLOGIA

O procedimento metodológico da pesquisa completa possui quatro fases: (1) ensaios destrutivos de corpos de prova fabricados com os polímeros ABS e PLA para aferição do comportamento mecânico dos materiais; (2) desenvolvimento da modelagem de componentes com geometrias complexas a serem impressos em 3D; (3) simulação e otimização na micro-escala de peças, segundo metodologia de Haeusler et al. (2017) e Crolla et al. (2017), a partir da utilização de *plugins* disponíveis para o *Grasshopper*<sup>3</sup> como *Karamba*, *Millipede*, *Kangaroo* e *Scan&Solve*<sup>TM</sup>; (4) simulação e otimização da macro-escala do sistema estrutural, segundo metodologias de Haeusler et al. (2017), Crolla et al. (2017) e Matson e Sweet (2016), utilizando *plugins* como *Karamba*.

Esse artigo trata especificamente da fase inicial da pesquisa, caracterizada por ensaios destrutivos de esforços de compressão axial e flexão, impressos prioritariamente no modelo de impressora 3D Cubex Duo, com área de impressão de 20 cm<sup>3</sup>. Por se tratar de uma pesquisa em andamento, os primeiros resultados foram publicados parcialmente (MARTINEZ, et al., 2017) para corpos de prova com malha interna em 45o, considerado mais resistente em performance estrutural em comparação aos exemplares com malha interna de 0o e 90o (LETCHER, WAYTASHEK, 2014). Este artigo visa, então, ampliar os resultados a partir da impressão de corpos de prova maciços, comparando-os. Em ambos, o método de modelagem e impressão inclui:

(a) estudo da otimização do rendimento da matéria-prima (filamentos termoplásticos ABS e PLA), e a relação entre o consumo, velocidade e tempo de impressão, dimensões dos modelos, massa e densidade do material;

(b) qualidade de acabamento e precisão do modelo de acordo com as espessuras estabelecidas pela impressora (0,1 mm; 0,25 mm ou 0,5 mm);

(c) otimização de material e controle das malhas estruturais internas geradas e malhas de suporte, no caso de corpos de prova maciços;

(d) estratégias de finalização e pós-produção do modelo;

(e) geração de arquivos .STL e a análise qualitativa de modelos criados através dos software *Rhinoceros* e *SketchUp*;

(f) impressão de corpos de prova cilíndricos e prismáticos para ensaios destrutivos em dimensões e quantidades definidas pela equipe de análise estrutural;

<sup>3</sup> Nesta etapa, vislumbra-se a criação de modelos numéricos estruturais a partir dos ensaios destrutivos dos modelos físicos, que permitam a definição de algoritmos e componentes no *Grasshopper*. Nessas fases subsequentes da pesquisa, não tratadas por este artigo, vislumbra-se a adoção do *Grasshopper*, uma linguagem de programação visual livre, cuja interação com o software *Rhinoceros* permitirá a produção de geometrias complexas e paramétricas. Este será adotado devido à possibilidade de associação a *plugins* de análise estrutural e a outras linguagens de programação, como *python*, para a criação de modelos numéricos estruturais. Os *plugins* de análise estrutural *Karamba*, *Millipede* e *Kangaroo* serão adotados por serem livres e recorrentemente citados na literatura, do mesmo modo que o *Scan&Solve*<sup>TM</sup>, porém este com uso por tempo limitado.

(g) avaliação do comportamento mecânico dos corpos de prova, submetidos a esforços de compressão axial e flexão, à luz das normas ASTM E2954 (ASTM E2954-15..., 2015) e ASTM D790 (ASTM D790-17..., 2017) que estabelecem parâmetros para execução de ensaios de polímeros à compressão axial e à flexão em três pontos, respectivamente;

(h) conclusões preliminares dos ensaios destrutivos.

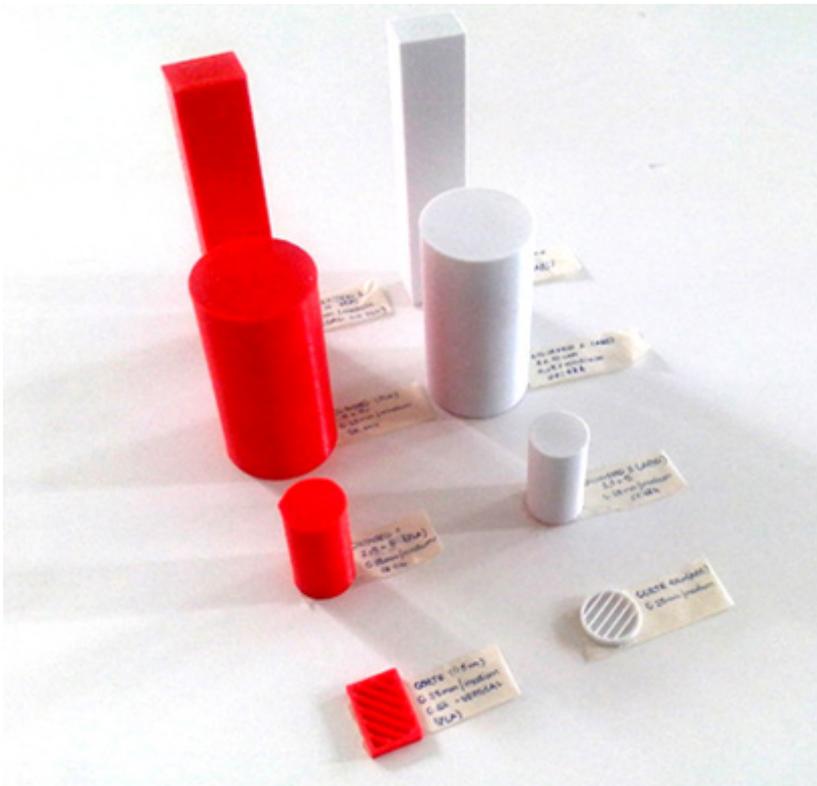
## IMPRESSÃO E ENSAIOS

Esta seção descreve a preparação do experimento, no que se refere às etapas de impressão e de ensaios destrutivos. A etapa de impressão refere-se ao número de corpos de prova, definição das dimensões das geometrias impressas, software utilizado e espessuras de camadas testadas. Apresenta também a descrição dos ensaios destrutivos, segundo os métodos de compressão axial e de flexão a três pontos, no que se refere aos equipamentos utilizados, os esquemas de montagem e os métodos numéricos para avaliação do comportamento mecânico dos filamentos ABS e PLA.

### Impressão

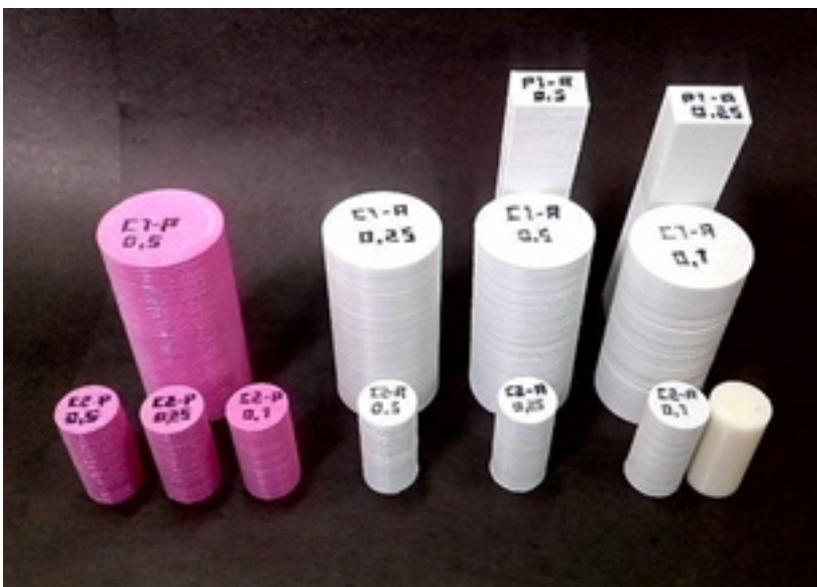
Como resultado da fase da impressão 3D, foram produzidos para os ensaios destrutivos três conjuntos com sete corpos de prova, formatados pelo *software Cubify*, padrão da impressora 3D *Cubex Duo*, com malha interna gerada automaticamente para otimização do consumo de matéria-prima, redução de custos e tempo de impressão. Durante o processo, percebeu-se a impossibilidade de impressão de corpos maciços no *software Cubify*, já que este definiu automaticamente uma malha interna estrutural, para a otimização do material. Por este motivo, adicionalmente foram formatados dois conjuntos com sete corpos maciços, a partir do *software* livre *KISSlicer*, com o maior controle de camadas e suportes.

Cada conjunto era caracterizado por três paralelepípedos (3,0 cm x 2,0 cm x 15,0 cm) e quatro cilindros nas dimensões de 2,5 cm de diâmetro e 5,0 cm de altura, e 5,0 cm de diâmetro e 10,0 cm de altura, impressos nos filamentos PLA e ABS. Os paralelepípedos foram produzidos em seus eixos vertical e horizontal, para verificar a possível influência da orientação das fibras no desempenho estrutural. Os corpos de prova com malha estrutural interna foram impressos com espessuras de 0,1 mm, 0,2 mm e 0,5 mm (segundo o padrão da impressora *Cubex Duo*), densidade média e sem nenhum suporte, enquanto os maciços foram produzidos na mesma configuração, embora encapsulados por uma pele de suporte (Figuras 1 e 2).



**Figura 1:** Os corpos de prova impressos verticalmente, com malha estrutural interna gerada pelo *software Cubify*, foram identificados por cores (laranja PLA e branco ABS) e respectivas configurações de impressão

**Fonte:** Autores (MARTINEZ et.al, 2017).



**Figura 2:** Os corpos de prova maciços, impressos verticalmente, foram identificados por cores (magenta PLA e branco ABS), e respectivas configurações de impressão

**Fonte:** Autores (MARTINEZ et.al, 2017).

Adicionalmente, foram impressos diversos cilindros com dimensões de 2,5 cm de diâmetro e 5,0 cm de altura nas impressoras de baixo custo, RepRap e Prusa i3, e um único protótipo na impressora profissional Dimension 1200 com camadas de 0,025 mm de espessura, exclusivamente no material ABS. A Figura 3 ilustra a diferença de qualidade de acabamento entre as impressoras de baixo custo (à esquerda) e as impressoras profissionais (à direita).



**Figura 3:** Comparação visual entre os cilindros em ABS.

À esquerda, cilindro impresso por impressora de baixo custo com espessura de camada de 0,1 mm e à direita, cilindro impresso com impressora profissional e camadas de 0,025 mm

**Fonte:** Autores (MARTINEZ et.al, 2017).

### Ensaio Destrutivos

As propriedades mecânicas dos materiais podem ser caracterizadas por vários métodos de ensaio, dentre os quais foram adotados dois: os ensaios de compressão axial e de flexão a três pontos. O primeiro refere-se a um esforço crescente de compressão distribuído de maneira uniforme ao longo da seção transversal do corpo de prova, de modo a provocar o seu encurtamento longitudinal; o segundo caracteriza-se por uma carga concentrada crescente aplicada no centro do vão de uma barra bi apoiada, com o objetivo de fletir a peça em torno do seu eixo de maior inércia.

### Identificação

Os corpos de prova foram identificados de acordo com a procedência do material (ABS e PLA), a espessura das camadas de impressão (0.50, 0.25 e 0.10), e suas dimensões (comprimento, largura e peso), aferidas com auxílio de régua e balança de precisão de 0,1 g. Como identificação, os corpos de prova foram nomeados em “A”, para ABS e “P” para PLA, seguido do número de identificação da espessura de camadas, sendo 50 para 0.50mm, 25 para espessuras de 0.25mm e 10 para espessuras de 0.10mm<sup>4</sup>. Em seguida os corpos de prova cilíndricos foram submetidos aos ensaios de compressão, enquanto os paralelepípedos à flexão.

### Ensaio de compressão axial

Os corpos de prova cilíndricos foram centralizados na máquina de ensaios universal, utilizando dois extensômetros analógicos: um para a medição da carga e outro, para a medição do deslocamento da placa superior. A carga foi aplicada de maneira incremental e medida pelo extensômetro analógico de constante  $K = 692 \text{ kgf/mm}$ , com valores de deformação da amostra obtidos em intervalos de medição de 0,05 mm. A Figura 4 traz o esquema de montagem.

<sup>4</sup> A identificação P50, P25 e P10 designa as amostras de PLA com 0.50, 0.25 e 0.10 mm de espessura, respectivamente. Enquanto a nomenclatura A50, A25 e A10 identifica as amostras de ABS com 0.50, 0.25 e 0.10 mm de espessura, respectivamente.



**Figura 4:** Esquema de montagem das amostras para o ensaio de compressão axial

**Fonte:** Autores (OMITIDO PARA AVALIAÇÃO CEGA, 2017).

A tensão de compressão para cada incremento foi calculada a partir da seguinte expressão:

$$\epsilon = \frac{P}{A} \quad (1), \text{ onde: } P = \text{Carga}; A = \text{Área da seção inicial.}$$

A deformação específica é dada pela equação:

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_i} \quad (2), \text{ onde: } \Delta L = \text{Variação de comprimento}; L_i = \text{Comprimento inicial.}$$

### Ensaio de flexão em três pontos

Os paralelepípedos foram marcados no centro do vão e a 3 cm das duas extremidades, antes de posicionados na máquina de ensaios universal (Figura 5). A carga foi aplicada de maneira incremental e medida com o extensômetro analógico de constante  $K = 692 \text{ kgf/mm}$ .

A equação matemática para o cálculo do momento fletor máximo no centro do vão é dada em função da distância entre os apoios (L) e da carga aplicada (P):

$$M = \frac{PL}{4} \quad (3)$$

O momento de inércia para a seção retangular foi obtido através da relação:

$$I = \frac{bh^3}{12} \quad (4) \quad \text{, onde: } b = \text{dimensão da base da seção retangular,} \\ h = \text{dimensão da altura da seção retangular.}$$

O módulo de resistência da seção transversal retangular, representado pela letra W pode ser obtido a partir da seguinte expressão:

$$W = \frac{I}{0.5h} \quad (5)$$

Por fim, a tensão de flexão na ruptura é dada pela equação:

$$\sigma = \frac{M}{W} \quad (6)$$



**Figura 5:** Preparação para o ensaio de flexão a três pontos

**Fonte:** Autores (MARTINEZ et.al, 2017).

## RESULTADOS E ANÁLISES

Uma vez que o comportamento mecânico dos corpos de prova impressos em polímeros ABS e PLA possui relação direta com o controle de qualidade na etapa de impressão, os resultados aqui apresentados serão divididos em duas seções: etapa de impressão e ensaios destrutivos.

A primeira apresenta a análise das limitações existentes na etapa de pré-impressão (armazenamento de material), impressão (tempo de impressão e consumo de material, descolamento de camadas, dentre outros), e pós-impressão (comportamento e variações nos corpos de prova no ambiente). Por sua vez, em relação aos ensaios destrutivos serão apresentados os principais coeficientes de resistência dos materiais, de corpos de prova com malha interna e maciços, comparando-os.

## Impressão

A Tabela 1 identifica e compara os corpos de prova ABS e PLA (finalizados e posteriormente testados), de acordo com as espessuras, dimensões, massa e tempo de impressão. Conforme resultado esperado, os corpos de prova com malha para preenchimento interno possuem, em geral, menor tempo de impressão e consumo de material, em comparação aos modelos maciços. Do mesmo modo, o tempo de impressão aumenta à medida que a espessura da camada é reduzida. No entanto, para os modelos maciços, não há variação considerável de consumo de material à medida que a espessura de camada diminui.

		FORMATO	MASSA (g)		TEMPO (HH:MM:SS)	
			MACIÇO	MALHA	MACIÇO	MALHA
ABS (mm)	0.50	CILINDRO (2.50 X 5.00cm)	25,67	10,64	1:03:00	0:35:00
		CILINDRO (5.00 X 10.00cm)	205,81	58,36	7:31:00	2:18:00
		PARALELEPIPEDO (3.00 X 2.00 X 15.00cm)	94,59	38,41	4:00:00	1:49:00
	0.25	CILINDRO (2.50 X 5.00cm)	25,78	8,67	2:06:00	2:04:00
		CILINDRO (5.00 X 10.00cm)	206,24	46,97	15:02:00	3:45:00
		PARALELEPIPEDO (3.00 X 2.00 X 15.00cm)	94,99	32,17	8:00:00	2:58:00
	0.10	CILINDRO (2.50 X 5.00cm)	25,83	10,2	5:17:00	4:51:00
		CILINDRO (5.00 X 10.00cm)	206,50	60,49	37:38:00	8:52:00
		PARALELEPIPEDO (3.00 X 2.00 X 15.00cm)	95,214	39,15	20:00:00	7:08:00
PLA (mm)	0.50	CILINDRO (2.50 X 5.00cm)	28,12	11,02	1:03:00	00:32:00
		CILINDRO (5.00 X 10.00cm)	225,41	54,72	7:31:00	1:59:00
		PARALELEPIPEDO (3.00 X 2.00 X 15.00cm)	103,60	37,50	4:00:00	1:31:00
	0.25	CILINDRO (2.50 X 5.00cm)	28,23	12,18	2:06:00	1:02:00
		CILINDRO (5.00 X 10.00cm)	225,88	67,62	15:02:00	4:27:00
		PARALELEPIPEDO (3.00 X 2.00 X 15.00cm)	104,04	43,86	8:00:00	3:33:00
	0.10	CILINDRO (2.50 X 5.00cm)	28,29	13,05	5:17:00	1:58:00
		CILINDRO (5.00 X 10.00cm)	226,17	71,90	37:38:00	8:42:00
		PARALELEPIPEDO (3.00 X 2.00 X 15.00cm)	104,28	47,22	20:00:00	7:04:00

**Tabela 1:** Comparação entre os corpos de prova maciços e com malha interna, no que se refere a massa (consumo de material) e o tempo de impressão

**Fonte:** Autores (MARTINEZ et.al, 2017).

Como as limitações das impressoras de baixo custo ainda são entraves para assegurar um rígido controle de resistência e qualidade uniforme dos modelos físicos. Além disso, sob as mesmas configurações de modelagem e controles de impressão (massa, densidade, tempo, temperatura, dentre outros), há também variações decorrentes das diferenças entre equipamentos. Abaixo descrevemos algumas limitações nas etapas de pré-impressão, impressão e pós-produção dos modelos.

### Etapa de pré-impressão

A variação de umidade do ambiente ocasiona pequenas variações dimensionais nos filamentos, decorrentes de fenômenos de retração e expansão, ainda no cartucho. Essa variabilidade foi ainda mais significativa no PLA, o que ocasionou maior facilidade de rompimento dos fios durante a impressão, gerando falhas de fluxo do material.

### Etapa de impressão

Peças maciças exigem maior atenção na configuração de parâmetros, sobretudo nas de menores dimensões. Os primeiros corpos de prova maciços apresentaram deformações causadas pelo extravasamento do preenchimento interno (Figura 6), interferindo diretamente nos resultados de resistência. A redução da espessura da camada de preenchimento interno, e inversamente, o espessamento da parede externa, foram essenciais para que os corpos de prova apresentassem um melhor acabamento. Além disso, ajustes constantes de temperatura, altura do bico e velocidade, contribuíram com a melhoria da série de corpos de prova.

No que se refere à integridade das camadas, as principais causas dos deslocamentos foram a variação de temperatura e as correntes de ar no ambiente de impressão. Assim, influenciaram o número de pessoas circulando, o fluxo de ar condicionado, a amplitude térmica durante um único dia, e a temperatura noturna baixa, principalmente no caso das impressões que atingiram 30 a 40 horas. Para minimizar o problema, a impressora *Cubex Duo* foi vedada lateralmente para evitar o fluxo de ar transversal à mesa, além da modelagem de uma casca externa ao modelo, para auxiliar a adesão das camadas. Objetos impressos sem a casca de proteção apresentaram problemas de descolamento da mesa, além da separação de camadas (Figura 6).



**Figura 6:** À esquerda, a camada indica extravasamento do material; os corpos de prova à direita possuem a casca de proteção criada para minimizar os problemas de impressão, decorrentes do descolamento das camadas

**Fonte:** Autores (MARTINEZ et.al, 2017).

Em impressões de longa duração (40 horas), as variações térmicas do ambiente são mais significativas, e a baixa velocidade de impressão diminui a manutenção de temperatura de extrusão, causando descolamento das camadas. Nestes casos, foi possível ouvir estalos decorrentes do desprendimento do material. No entanto, a casca de proteção, apesar de benéfica, impedia a visualização destas falhas durante o processo de impressão.

### Etapa de pós-produção

Se durante a etapa de pré-produção, o PLA sofreu maior variação dimensional decorrente de umidade e temperatura do ambiente, na fase de pós-produção, foi o ABS que apresentou menor durabilidade de integridade das camadas ao longo do tempo. A Figura 7 ilustra como as falhas de impressão no ABS aumentam no decorrer de poucos dias, principalmente nos corpos de prova maciços, com altura superior a 10 cm e longo tempo de impressão. Nos ensaios de resistência do material (Figura 8), essas falhas nas camadas também são constatadas, mesmo em corpos de prova que possuíam visualmente, uma aparente integridade preservada.



**Figura 7:** Descolamento das camadas após o fim da impressão, em poucas horas, e acentuada ao longo de alguns dias

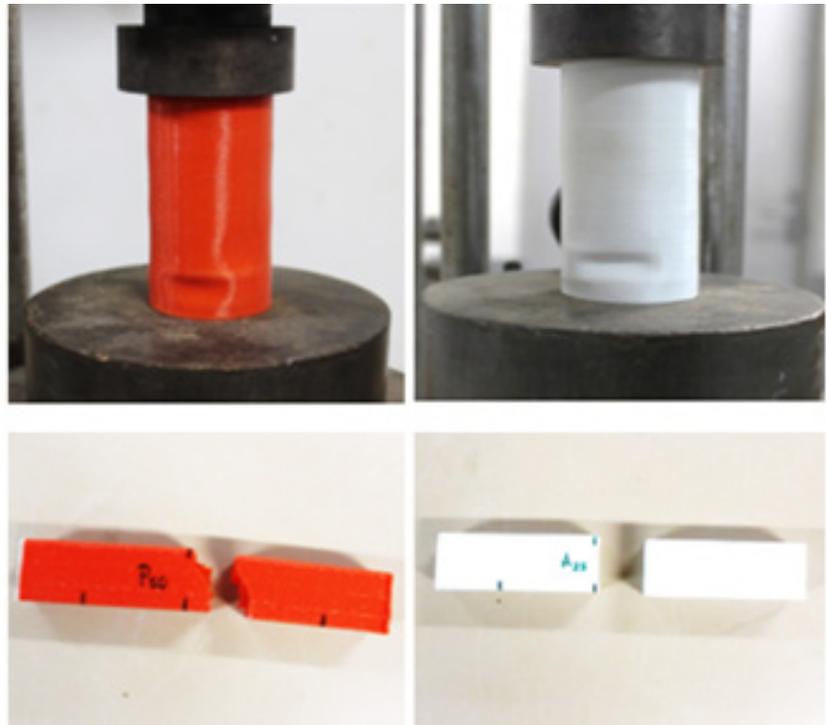
**Fonte:** Autores (MARTINEZ et.al, 2017).

Em geral, os maiores problemas durante a fase de impressão e pós-produção foram constatados nos corpos de prova maciços, decorrentes do maior tempo de impressão. A geração da malha interna automática, além de otimizar o consumo de material, reduz trincas, desprendimento de camadas e outras falhas, e prolongam a vida útil do objeto.

### Ensaio destrutivos

Foram ensaiados inicialmente os corpos de prova com malha estrutural interna, densidade média, uma vez que a redução do tempo de impressão, consumo de material e de falhas durante o período de impressão e pós-produção aumentam a viabilidade de sua produção em escala. A mesma metodologia foi aplicada na sequência, para os ensaios com os objetos maciços, porém os problemas decorrentes das etapas de pré-impressão (armazenamento do material) e impressão (tempo prolongado, em média 30 horas), reduziram a quantidade de amostras ensaiadas.

De modo semelhante, alguns exemplares também apresentaram falhas decorrentes da fase de impressão durante os ensaios destrutivos. A Figura 8, por exemplo, ilustra o descolamento de camadas de um paralelepípedo em ABS, quando submetido ao ensaio de compressão axial. O descolamento possui relação direta com variação de temperatura durante a fase de depósito da camada de filamento e não foi considerado na avaliação do comportamento mecânico do polímero.



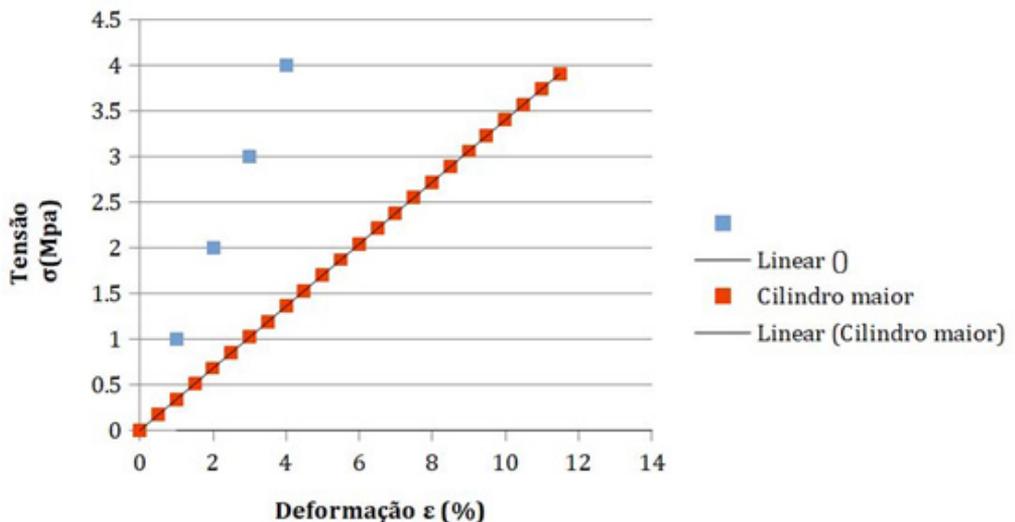
**Figura 8:** Amostras dos dois materiais rompidos à compressão axial e à flexão. A amostra de ABS, abaixo à direita, indica ruptura devido a problemas de impressão (em uma única camada de filamento), sem relação com a resistência do material  
**Fonte:** Autores (MARTINEZ et.al, 2017).

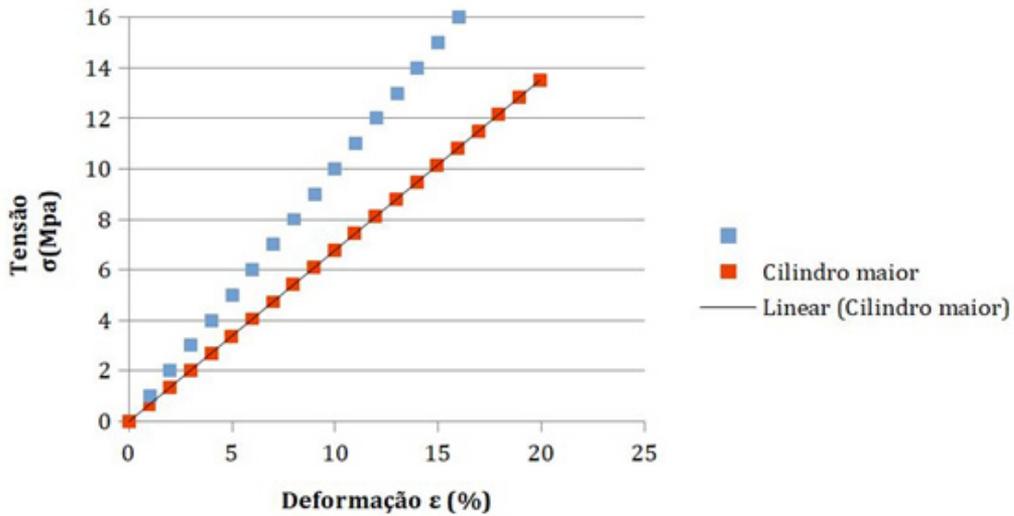
### Corpos de prova com malha estrutural interna: ensaio de compressão axial

Tanto nas amostras de PLA quanto nas de ABS, submetidas à compressão axial, os gráficos de tensão x deformação traduzem o comportamento frágil de ambos os materiais: falha sem deformação plástica visível. Ainda é possível observar uma variação maior entre os valores de módulo de elasticidade para as amostras de PLA. Para as amostras de ABS, os gráficos tensão x deformação apresentam inclinações semelhantes para a mesma densidade de fibras.

**Gráfico 1:** Curva tensão de deformação para as amostras de PLA, com 0,50mm de espessura (P50)  
**Fonte:** Autores (MARTINEZ et.al, 2017).

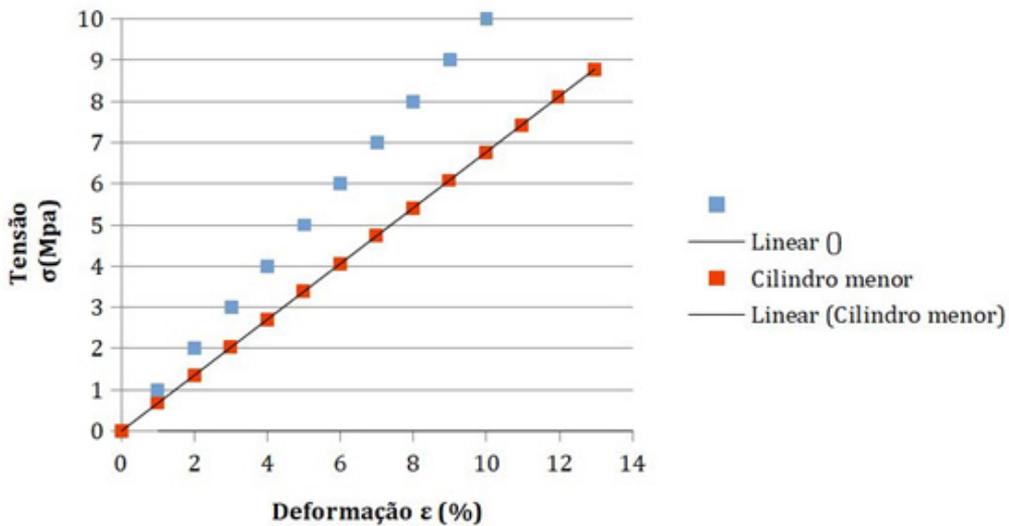
Os Gráficos 1, 2 e 3 ilustram os resultados de tensão x deformação para cada amostra ensaiada, e estão dispostos de acordo com a densidade de fibras do material (espessura das camadas).





**Gráfico 2:** Curva tensão de deformação para as amostras de ABS, com 0.25 mm de espessura (A25)

**Fonte:** Autores (MARTINEZ et.al, 2017).



**Gráfico 3:** Curva tensão de deformação para as amostras de ABS, com 0.50 mm de espessura (A50)

**Fonte:** Autores (MARTINEZ et.al, 2017).

O módulo de elasticidade do material foi obtido a partir das médias da inclinação dos gráficos tensão x deformação: Para o PLA,  $E = 52,3 \text{ Mpa}$  / Para o ABS,  $E = 65,42 \text{ Mpa}$ . Por definição, o módulo de elasticidade indica a resistência do material à deformação sob estresse (BRISCHETTO et. al, 2018), o que significa que o ABS suporta uma tensão maior para o mesmo grau de deformação que o PLA.

### Corpos de prova com malha estrutural interna: Ensaio de flexão em três pontos

Com relação aos ensaios de flexão, o maior momento cortante e momento fletor ocorrem no centro do vão. O carregamento produz esforços de compressão normal nas fibras superiores e tração nas inferiores. A disposição das fibras internas no material potencializa um comportamento anisotrópico, que confere diferentes propriedades de resistência à tração e à compressão. É possível notar nas amostras de plástico uma combinação de efeitos ao longo da seção do centro do vão: nas fibras inferiores prevalecem as tensões normais de tração, e nas superiores às tensões de cisalhamento, responsáveis pela fratura inclinada, no ponto de maior fragilidade do material. Para as amostras de ABS, a ruptura ocorre na junção entre os filetes da impressão, provavelmente ocasionadas por falhas de impressão.

A Tabela 2 apresenta os resultados para os ensaios de flexão e as diversas propriedades de resistência de ambos os materiais, identificados pela letra P para PLA e A para ABS, seguido da espessura da camada. Segundo os testes, o PLA possui índices de resistência muito superiores ao ABS, no que se refere ao momento fletor máximo, tensão de flexão de ruptura, esforço cortante e tensão de cisalhamento. Por outro lado, o ABS possui desempenho superior no módulo de elasticidade, e índices semelhantes para o momento de inércia e módulo de resistência. Também é notório que quanto menor a espessura das camadas, maior é o desempenho estrutural do sólido.

CP	P (kN)	Área (cm <sup>2</sup> )	I (cm <sup>4</sup> )	M <sub>f máx</sub> (kNxcn)	W (cm <sup>3</sup> )	σ (Mpa)	Q (cm <sup>3</sup> )	V (kN)	τ (Mpa)
P25	2.08	6.36	5.05	4.62	3.27	13.85	4.91	1.04	4.80
P50	1.73	6.19	4.74	3.89	3.13	12.22	4.69	0.87	4.12
A25	0.76	6.28	4.92	1.69	3.21	5.18	4.82	0.38	1.78
A50	0.69	6.62	5.39	1.54	3.45	4.38	5.17	0.35	1.54

**Tabela 2:** Resultados para os ensaios de flexão. Onde, CP= corpo de prova, P= Carga, I= momento de inércia, M= Momento fletor máximo, W= módulo de resistência, σ = tensão de flexão de ruptura, Q= carga variável, V=esforço cortante, τ = tensão tangencial ou de cisalhamento

**Fonte:** Autores (MARTINEZ et.al, 2017).

### Corpos de prova maciços: ensaio de compressão axial e flexão em três pontos

No que se refere à compressão axial, os corpos de prova maciços, em ABS e PLA, também traduzem o comportamento frágil de ambos os materiais. Os corpos de prova cilíndricos em ABS (h= 10 cm) não romperam. A deformação começou a ocorrer a partir de 7000 Kgf, e foram submetidos à carga final aproximada de 11000 Kgf. No geral, a variação dimensional significa uma compactação de aproximadamente 40% em relação ao eixo vertical, como ilustra a Tabela 3. No entanto, essa mesma compactação não foi observada em corpos de prova com h= 5 cm em ABS. A variação do tempo de impressão dos corpos de prova nestes diferentes formatos (Tabela 1), e os consequentes prejuízos no controle de produção, pode ser uma das variáveis responsáveis pelo comportamento diferente do material.

Por outro lado, os corpos de prova em PLA foram submetidos à cargas maiores (aproximadamente 17000 Kgf), mas não sofreram deformação significativa, como ilustrado pela Tabela 4, o que indica a maior resistência à compressão. Os valores de tensão em Mpa obtidos para os corpos PLA aproximam-se de 90 Mpa, enquanto para os corpos de prova em ABS os valores aproximam-se dos 50 Mpa.

CP	Altura Final dos CPs (cm)	Deformação Longitudinal (ε)
A25	5,70	0,429
A10	6,38	0,341
A50	6,20	0,379

**Tabela 3:** Os corpos de prova em ABS (A50, A25 e A10), com espessuras de impressão de 0,5mm, 0,25 mm e 0,1 mm, respectivamente, sofreram deformação sem rompimento

**Fonte:** Autores (2018).

Corpo de Prova	D <sub>1</sub> (cm)	D <sub>2</sub> (cm)	D <sub>méd.</sub> (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	H <sub>1</sub> (cm)	H <sub>2</sub> (cm)	H <sub>méd.</sub> (cm)	Carga (kgf)	Tensão (MPa)
A25	4,95	4,97	4,96	19,32	9,97	9,99	9,98	11070	57,29
A10	5,00	4,98	4,99	19,56	9,70	9,67	9,69	11470	58,65
A50	4,94	4,97	4,96	19,28	10,00	9,98	9,99	10900	56,53
P50	5,00	4,96	4,98	19,48	10,10	10,15	10,13	17640	90,56
A25	2,47	2,47	2,47	4,79	4,98	4,97	4,98	2763	57,67
A10	2,47	2,49	2,48	4,83	4,99	4,99	4,99	2227	46,11
A50	2,46	2,48	2,47	4,79	5,08	5,07	5,08	1775	37,04
P25	2,46	2,50	2,48	4,83	5,05	5,05	5,05	4180	86,53
P10	2,50	2,50	2,50	4,91	4,80	4,80	4,80	4560	92,90
P50	2,50	2,52	2,51	4,95	5,06	5,05	5,06	4290	86,70

**Tabela 4:** Resultados de compressão axial para os corpos de prova em ABS e PLA

**Fonte:** Autores (2018).

No que se refere à flexão em três pontos (Tabela 5), não foram realizados testes com corpos de prova em PLA, porém os corpos de prova maciço também apresentam desempenho superior aos modelos com malha estrutural interna, com densidade média. No entanto, em ambos os casos, a ruptura tende a ocorrer na direção da camada do filamento, o que indica a necessidade de otimização do desempenho estrutural baseado na direção das camadas de impressão, em relação à geometria do modelo.

Corpo de Prova	B (cm)	H (cm)	L (cm)	Carga (kgf)	Tensão (MPa)
A25	2,00	2,99	9,90	140,07	23,27
A50	2,00	3,00	9,95	324,30	53,78

**Tabela 5:** Resultados de flexão em três pontos para os corpos de prova em ABS

**Fonte:** Autores (2018).

## CONCLUSÕES

O trabalho apresentado constitui ainda uma investigação em processo e, portanto, requer outros ensaios. Para um estudo estatístico mais relevante, serão feitos também testes com uma amostragem maior de corpos de prova.

Os primeiros testes indicam que a resistência à compressão, dentre os modelos com malha interna, é maior para o ABS. No entanto, em corpos de prova maciços, o PLA possui maior desempenho e deformação visível mínima, enquanto o ABS apresenta menor resistência e maior deformação dimensional.

Para os testes em flexão de três pontos, o PLA possui índices de resistência muito superiores ao ABS. Também é notório que quanto menor a espessura das camadas, maior é o desempenho estrutural do sólido. As rupturas, em geral, ocorreram nas junções entre camadas, o que indica que para melhores resultados de desempenho estrutural, recomenda-se que a direção do filamento seja perpendicular à seção transversal do objeto impresso.

## DISCUSSÕES FUTURAS

Pretendemos também utilizar outros métodos normativos internacionais para testes mecânicos de plásticos e polímeros, já utilizados em alguns *plugins* de simulação no *Rhinoceros* e *Grasshopper*, visando a comparação entre a simulação computacional e os ensaios físicos (fase 03 da pesquisa). Nesta etapa, vislumbra-se a criação de modelos numéricos estruturais a partir dos resultados dos ensaios destrutivos dos modelos físicos, que permitam a definição de novos algoritmos e componentes no *Grasshopper*. Conhecendo-se os valores de resistências dos polímeros ABS e PLA, para as impressoras de baixo-custo recorrentes em laboratórios de prototipagem, será possível criar ambientes de simulação computacional que se aproximem da realidade pós-impressão.

A pesquisa também está em fase de exploração de corpos de prova produzidos em outros modelos de impressoras de baixo custo, tais como *Prusa* e *Zortrax*. Os resultados preliminares já indicam que a qualidade de acabamento dos objetos, relacionados também à menor espessura de camadas de filamento, contribui para a maior resistência dos materiais. Neste sentido, espera-se também que os testes destrutivos dos corpos de prova da impressora profissional *Dimension 1200* e *Zortrax*, não discutidos neste artigo, apontem para a viabilidade de uso da impressão 3D com filamentos termoplásticos, em maior escala e com relativo desempenho estrutural na produção de pequenos componentes construtivos.

## AGRADECIMENTOS

Ao CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - pelo apoio à pesquisa “Modelagem Digital de Projetos Arquitetônicos Baseados no Desempenho Energético e Estrutural” (processo 471634/2014-0 - APQ), e CAPES Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior pela concessão de bolsa de iniciação científica Programa Jovens Talentos para a Ciência.

## REFERÊNCIAS

- ASTM D790-17 Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials. **ASTM American Society for Testing and Materials**, West Conshohocken, PA, 2017. <http://dx.doi.org/10.1520/D0790-17>
- ASTM E2954-15 Standard Test Method for Axial Compression Test of Reinforced Plastic and Polymer Matrix Composite Vertical Members. **ASTM American Society for Testing and Materials**, West Conshohocken, PA, 2015. <http://dx.doi.org/10.1520/E2954-15>
- BRISCHETTO, S.; FERRO, C.G.; TORRE, R.; MAGGIORE, P. 3D FDM production and mechanical behavior of polymeric sandwich specimens embedding classical and honeycomb cores. **Curved and Layer. Structure**. Berlin: De Gruyter, 2018, p.80-94.
- CROLLA, K.; WILLIAMS, N. Smart Nodes: A system for variable structural frames with 3D metal-printed nodes. In: ANNUAL CONFERENCE OF THE ASSOCIATION FOR COMPUTER AIDED DESIGN IN ARCHITECTURE (ACADIA), 34, 2014, Los Angeles. **Proceedings...** Los Angeles: ACADIA, 2014. p. 311-316. ISBN 9781926724478.
- CROLLA, K.; WILLIAMS, N.; MUEHLBAUER, M.; BURRY, J. SmartNodes Pavilion. Towards Custom-optimized Nodes Applications in Construction. In: INTERNATIONAL CONFERENCE OF THE ASSOCIATION FOR COMPUTER-AIDED ARCHITECTURAL DESIGN RESEARCH IN ASIA (CAADRIA), 22, 2017, Hong Kong. **Proceedings...** Hong Kong: CAADRIA, 2017. p. 467-477. ISBN 9789881902689.

DIVYATHEJ, M V; VARUN, M.; RAJEEV, P. Analysis of mechanical behavior of 3D printed ABS parts by experiments. In: **INTERNATIONAL JOURNAL OF SCIENTIFIC & ENGINEERING RESEARCH**, Volume 7, Issue 3, March-2016. ISSN 2229-5518

DRITSAS, S.; CHEN, L.; SASS, L. Small 3D Printers. Large Scale Artifacts. In: INTERNATIONAL CONFERENCE OF THE ASSOCIATION FOR COMPUTER-AIDED ARCHITECTURAL DESIGN RESEARCH IN ASIA (CAADRIA), 22, 2017, Hong Kong. **Proceedings...** Hong Kong: CAADRIA, 2017. p. 821-831. ISBN 9789881902689.

HAEUSLER, M. H.; MUEHLBAUER, M.; BOHNENBERGER, S.; BURRY, J. Furniture Design Using Custom-Optimised Structural Nodes. In: INTERNATIONAL CONFERENCE OF THE ASSOCIATION FOR COMPUTER-AIDED ARCHITECTURAL DESIGN RESEARCH IN ASIA (CAADRIA), 22, 2017, Hong Kong. **Proceedings...** Hong Kong: CAADRIA, 2017. p. 841-851. ISBN 9789881902689.

LETCHER, T.; WAYTASHEK, M. Material Property Testing of 3D-Printed Specimen in PLA on an entry-level 3D printer. In: INTERNATIONAL MECHANICAL ENGINEERING CONGRESS & EXPOSITION (IMECE), 2014, Montreal. **Proceedings...** Montreal: IMECE, 2014. p. 1-8.

MATSON, C. W.; SWEET, K. Simplified for Resilience: A parametric investigation into a bespoke joint system for bamboo. In: CONGRESO DE LA SOCIEDAD IBEROAMERICANA DE GRÁFICA DIGITAL (SIGrADi), 20, 2016, Buenos Aires. **Proceedings...** Buenos Aires: Blucher Design Proceedings, 2016. p. 284- 289. <http://dx.doi.org/10.5151/despro-sigradi2016-801>

NABONI, R.; PAOLETTI, I. **Advanced Customization in Architectural Design and Construction**. Heidelberg: Springer, 2015. ISBN 978-3-319-04423-1.

RASPALL, F.; BANÓN, C. (2016). vMesh: How to print Architecture? In: CONGRESO DE LA SOCIEDAD IBEROAMERICANA DE GRÁFICA DIGITAL (SIGrADi), 20, 2016, Buenos Aires. **Proceedings...** Buenos Aires: Blucher Design Proceedings, 2016. p. 394-398. <http://dx.doi.org/10.5151/despro-sigradi2016-771>

MARTINEZ, A. C. P.; SOUZA, D. L. de; SANTOS, D. M. dos; PEDROTI, L. G.; MARTINS, M. A. D. Simulação de desempenho estrutural baseada na prototipagem rápida com impressão 3d. In: CONGRESO DE LA SOCIEDAD IBEROAMERICANA DE GRÁFICA DIGITAL (SIGrADi), 21, 2017, Concepción. **Proceedings...** Concepción: Blucher Design Proceedings, 2017. p. 333-339. ISSN 2318-6968, <http://dx.doi.org/10.5151/despro-sigradi2017-052>

**Andressa Carmo Pena Martinez**  
andressamartinez@gmail.com

**Douglas Lopes de Souza**  
dglopes@gmail.com

**Denise Mônico dos Santos**  
dglopes@gmail.com

**Leonardo Gonçalves Pedroti**  
lpedroti.ufv@gmail.com

**Joyce Correna Carlo**  
correnacarlo@gmail.com

**Marianna Auxiliadora Dias Martins**  
marianna.martins@ufv.br