

## **ESTUDO DA RESISTÊNCIA MECÂNICA NOS PROTOTIPOS FABRICADOS ATRAVES DO PROCESSO FDM**

---

**Resumo:** A manufatura aditiva é considerada um dos pilares da indústria 4.0 e, é uma tecnologia que auxilia no desenvolvimento de novos produtos, pois permite produzir protótipos físicos a partir de arquivos CAD 3D (Computer Aided Design) com objetivos de testá-los ou apresentar aos clientes ou ainda fabricar produtos personalizados, reduzindo desta forma o tempo de espera, pois, não existe, por exemplo, a necessidade de construção de moldes. Entretanto, esta tecnologia apresenta algumas limitações, sendo uma delas a escassez de pesquisas relacionadas aos erros geométricos e resistência mecânica dos produtos fabricados através do processo de deposição de material fundido (FDM). Neste contexto, este artigo tem por objetivo apresentar os resultados de análises das influências dos diferentes parâmetros construtivos sobre as propriedades mecânicas dos corpos de prova obtidos através do processo de manufatura aditiva por FDM. Para tal, foi modelado em sistema CAD 3D corpo de prova padrão ASTM D638, o mesmo foi exportado em arquivos STL (surface tessellation language) e transferido para a impressora 3D Graber I3 TEK3D arquitetura aberta e fabricados pelo processo de manufatura aditiva baseada em filamentos, alterando as seguintes variáveis de entrada: três velocidades de impressão (20mm/s; 40mm/s e 60 mm/s); três ângulos de impressão interna (15°; 30° e 45° graus) e três tipos de preenchimentos padrões (rectilinear, concêntrico e honeycomb). Assim, foram gerados um arranjo fatorial  $3^3$  totalizando 27 corridas com três replicas totalizando 81 experimentos. As variáveis de saída foram os tempos de fabricação e a resistência mecânica a tração e comprimento filamento utilizado.

**Palavras-chave:** Manufatura aditiva, propriedades mecânicas, FDM.

## 1 INTRODUÇÃO

O Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC) tem, dentre suas finalidades, realizar pesquisa aplicada e promover o desenvolvimento tecnológico de novos processos, produtos, serviços e conhecimentos, nesta perspectiva, oferece semestralmente programas de apoio ao desenvolvimento de projetos que contemplem a pesquisa como princípio educativo, que preferencialmente articulem com as unidades curriculares dos cursos dos câmpus do IFSC.

Dentro deste contexto, este artigo tem como objetivo apresentar os resultados de uma pesquisa realizada com alunos bolsistas do curso técnico integrado em mecânica. A temática da pesquisa está relacionada com a manufatura aditiva, que é um dos pilares da indústria 4.0.

Segundo Volpato e Carvalho (2017), a manufatura aditiva pode ser definida como um processo de fabricação por meio da adição sucessiva de material na forma de camadas, com informações obtidas diretamente de uma representação geométrica computacional 3D do componente. Ainda de acordo com os autores, são várias as aplicações da manufatura aditiva como na modelagem e prototipagem (auxílio visual, modelos de apresentação e encaixe e montagem) e na manufatura final como peças funcionais.

As vantagens da utilização da manufatura aditiva são muitas, como por exemplo: é possível fabricar qualquer geometria, mesmo as mais complexas; pouco desperdício de material e utilização eficiente de energia, não requer dispositivos de fixação, não é necessária a troca de ferramentas durante a fabricação do componente; o componente é fabricado em um único equipamento, do início ao fim, ou seja, numa única etapa (VOLPATO e CARVALHO, 2017 e A VOZ DA INDÚSTRIA, 2017).

Contudo, o processo de manufatura aditiva apresenta algumas restrições como: em geral, as propriedades dos materiais obtidos por este processo não são as mesmas dos materiais processados de forma tradicional e a precisão e o acabamento superficial são inferiores aos das peças obtidas por processos convencionais (VOLPATO e CARVALHO, 2017).

Assim, por se tratar de um tema importante e com grande perspectiva de crescimento, este trabalho teve como objetivo analisar a influência dos diferentes parâmetros construtivos sobre as propriedades mecânicas dos protótipos obtidos através do processo de manufatura aditiva por FDM (FDM, de *Fused Deposition Modeling*).

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

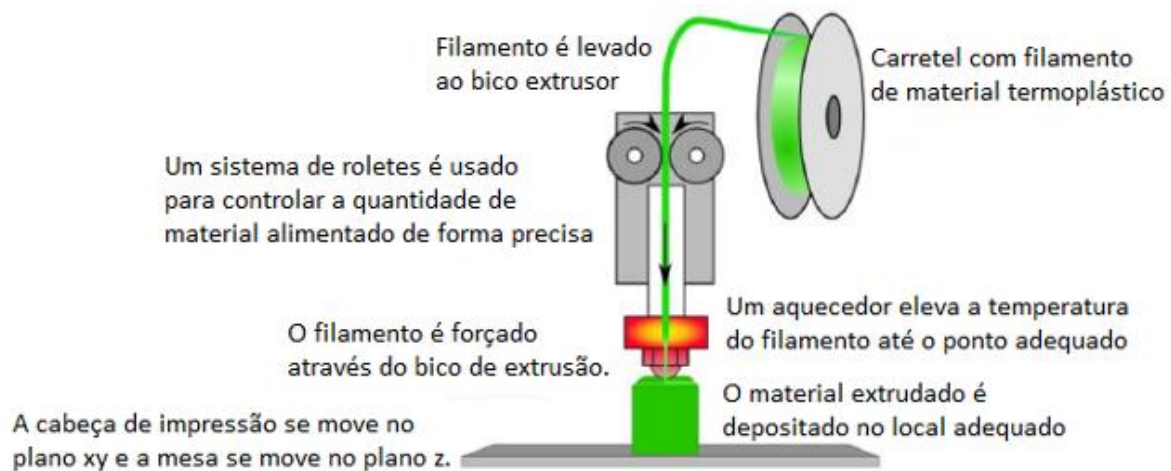
A manufatura aditiva pode ser definida como um processo de fabricação através da adição sucessivas de material na forma de camadas (VOLPATO e CARVALHO, 2017). Segundo os autores, a manufatura aditiva permite fabricar peças físicas com informações obtidas diretamente de um modelo geométrico tridimensional (3D) obtido por um sistema CAD (*Computer Aided Design*).

Neste projeto foi utilizado o processo de extrusão de material, onde o material é extrudado através de um bico ou orifício, sendo seletivamente depositado (VOLPATO e CARVALHO, 2017).

Entre as várias tecnologias disponíveis no mercado para a produção de peças fabricadas através da extrusão de material, estão as tecnologias de baixo custo surgidas recentemente e são baseadas no princípio de extrusão de material, em especial na tecnologia FDM (de *Fused Deposition Modeling*), ou seja com alimentação por filamentos (VOLPATO, 2017), que foi utilizada neste projeto. Este processo de FDM constrói o protótipo por deposição de um material extrudado. A cabeça de extrusão com movimentos nos eixos X-Y, posicionada sobre uma mesa com movimento no eixo Z, recebe continuamente o material na forma de um fio, aquecendo-o até o ponto semilíquido ou pastoso (VOLPATO, 2006).

Lizardo *et al.*,(2016), descreve o processo de FDM da seguinte forma: um carretel de filamento de material termoplástico é alimentado a uma cabeça de impressão por meio de um sistema de roletes. O filamento passa por um aquecedor onde atinge uma temperatura de trabalho e é forçado através de um bico extrusor. A cabeça de impressão se movimenta no plano XY depositando o material extrudado no local adequado para formar uma camada da geometria desejada. A mesa então se desloca no eixo Z e o processo é repetido até que o processo termine. A figura 1 ilustra o esquema de funcionamento.

Figura 1. Esquema de funcionamento do processo FDM



Fonte: adaptado de LIZARDO *et al.*, 2006.

As tecnologias de manufatura aditiva baseada no princípio de extrusão de material estão entre as mais utilizadas atualmente, seja nas aplicações industriais ou nas populares ou domésticas (VOLPATO, 2017), segundo o autor, esta grande popularização, observada recentemente, está fortemente associada ao princípio de extrusão de material, pois a maioria das impressoras 3D de baixo custo e pequeno porte baseia-se nesse princípio, em particular com alimentação por filamentos (VOLPATO, 2017).

Lizardo *et al.*,(2016) descreve que as principais vantagens do processo são: ótimo custo-benefício, menor tempo de fabricação, eliminação de ferramentas de alto valor agregado e flexibilidade. Volpato (2017) ainda destaca como vantagens a simplicidade do princípio de deposição de material, permite a utilização de vários termoplásticos, incluindo os polímeros classificados como de engenharia e pode ser utilizado em ambiente de escritório com alguns materiais, sem exaustão.

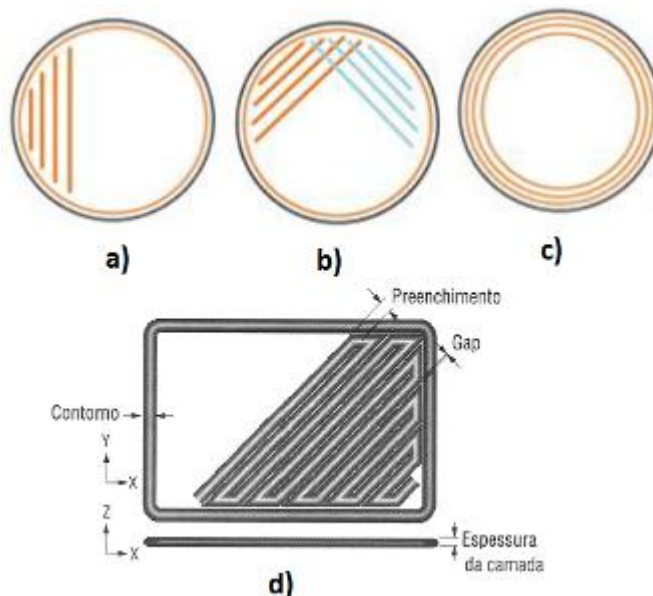
Entretanto, este processo apresenta algumas deficiências como: necessita de pós-processamento para remoção das estruturas de suporte, número limitado de materiais disponíveis para a obtenção de protótipos, o processo é relativamente lento e a precisão dimensional e a resolução dos detalhes que podem ser reproduzidos são restritas.

Conforme descrito, no processo FDM, o material é depositado camada por camada, inicialmente no contorno da geometria e depois em seu interior, essa deposição de material no interior da camada é denominada preenchimento (Lizardo *et al.*,2016), assim, a tecnologia FDM permite a utilização de algumas estratégias de preenchimento da área de cada camada (VOLPATO, 2006).

As mais utilizadas no processo são as estratégias Raster, Contour ou uma combinação das duas. Muitas vezes o preenchimento Raster é alternado nas camadas para conseguir maior resistência. A Figura 2 (a;b;c) ilustra as formas de preenchimento citadas.(LIZARDO *et al*,2016).

Os principais parâmetros que podem ser controlados em um processo FDM são: a espessura da camada, a espessura do filamento no preenchimento e no contorno, fresta (gap) entre os filamentos depositados e o ângulo de Raster (Volpato, 2006). Esses parâmetros são controlados ajustando a temperatura do bico extrusor, a velocidade de alimentação do filamento termoplástico, a velocidade de deslocamento do cabeçote e seu movimento (Lizardo *et al*,2016). A Figura 2 (d) ilustra esses parâmetros de preenchimento.

Figura 2 – Representação esquemática de uma camada de material sendo depositada no processo FDM com alguns dos parâmetros de controle



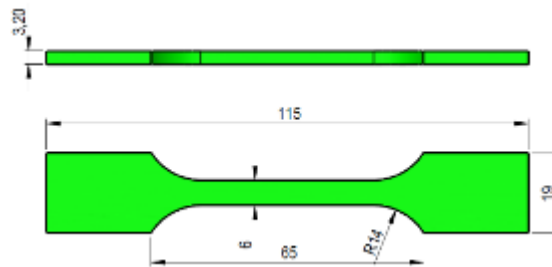
Fonte: adaptado de VOLPATO, 2006 e LIZARDO *et al*,2016.

Segundo Magalhães *et al.* (2010), dois parâmetros se mostraram primordiais para a qualidade estrutural das peças produzidas pelo processo FDM: os valores de gap e a orientação da disposição do preenchimento. Segundo os autores, menores valores de gap reduzem os vazios estruturais resultando em melhores propriedades mecânicas. Devido à forma de fabricação, as propriedades mecânicas são diferentes em diferentes direções (anisotrópicas). Alternando então a disposição do preenchimento, favorece-se uma direção ou outra (MAGALHÃES *et al.* (2010).

### 3 METODOLOGIA

A metodologia que foi adotada para a realização da pesquisa, seguiu as seguintes etapas: (a) pesquisa bibliográfica que teve por finalidade sistematizar as principais características do processo de modelagem por fusão e deposição (FDM) através dos trabalhos já desenvolvidos sobre este assunto; principalmente trabalhos sobre os parâmetros que podem ser controlados durante o processo de FDM. (b) Pesquisa experimental, que envolveu as seguintes atividades: I) Modelagem CAD (*Computer-aided design*) do corpo de prova padrão ASTM 638, conforme figura 3.

Figura 3 – Corpos de prova ASTM D638

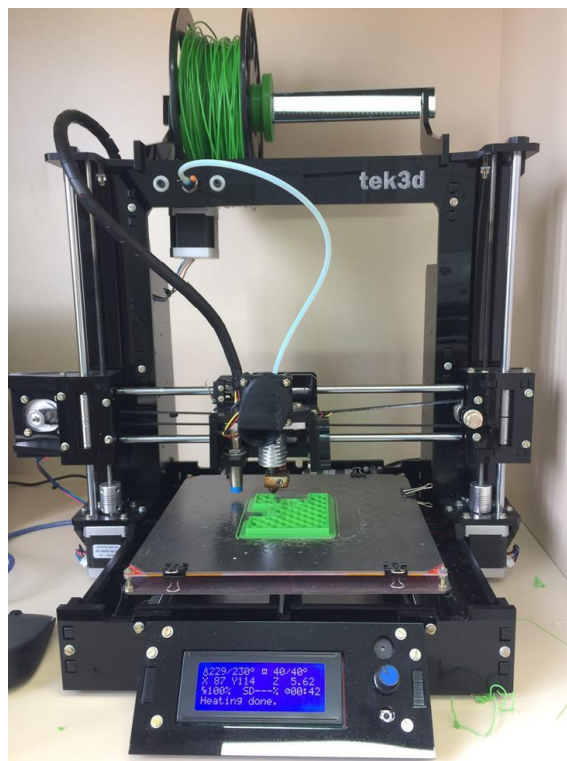


Fonte: os autores

II) Conversão do arquivo para STL (*Surface Tessellation Language*). O STL é um formato de arquivo específico que deve ser importado para o *software* gerar as trajetórias em linguagem de códigos para a construção do modelo matemático 3D. O *software* utilizado foi o SLIC3R (versão 1.2.2 or higher), com sistema de fonte aberta, que permite alterar vários parâmetros de impressão.

III) Transferência para a impressora 3D e manipulação do arquivo. O modelo de impressora 3D utilizada foi a Graber I3 TEK 3D de arquitetura aberta, conforme figura 4.

Figura 4 – Impressora 3D modelo Graber I3 TEK 3D






Fonte: os autores.

IV) Fabricação dos corpos de prova: as seguintes variáveis de entrada foram alteradas: três velocidades de impressão (20 mm/s, 40mm/s e 60mm/s); três ângulos de impressão interna (15°; 30° e 45° graus) e três tipos de preenchimentos padrões (Rectilinear, Concêntrico e

Honeycomb), conforme tabela 1. Com base nos números de fatores e níveis, foi selecionado um arranjo fatorial  $3^3$ , gerando vinte sete experimentos com mais três réplicas totalizando 81 corridas.

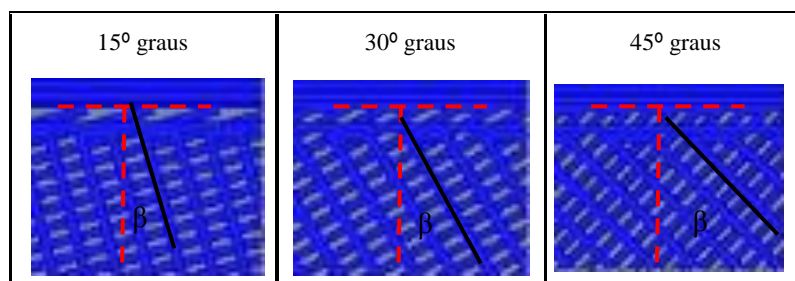
Tabela 1 – Organização dos experimentos, arranjo ortogonal L9

Cp	Ângulo impressão interna	Velocidade impressão mm/s			Tipo de Preenchimento
		20	40	60	
1	15°	20	40	60	Honeycomb 
2	30°	20	40	60	
3	45°	20	40	60	
4	15°	20	40	60	Concentric 
5	30°	20	40	60	
6	45°	20	40	60	
7	15°	20	40	60	Rectilinear 
8	30°	20	40	60	
9	45°	20	40	60	

Fonte: os autores

O ângulo de preenchimento interno ( $\beta$ ) é uma variável na qual muda a posição dos monofilamento paralelamente ao plano de trabalho (x;y) e esta mudança pode ser evidenciada na figura 5.

Figura 5 – Ângulos de preenchimento internos



Fonte: os autores

A tabela 2 a seguir apresenta os parâmetros fixos que da impressora que foram utilizados.

Tabela 2 – Parâmetros fixos da impressora

Parâmetros Fixos	Valores
Material	ABS
Temperatura de impressão	230°C
Temperatura da mesa	110°C
Altura das camadas	0,2mm

Fonte: os autores

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Tempos de fabricação

Dos 27 experimentos simulados percebe-se que, o ângulo de posição interna na deposição do filamento não altera de forma significativa o tempo de fabricação. A tabela 3 ilustra os resultados obtidos com velocidade de 20mm/s nos três tipos de preenchimento.

Tabela 3 – Ângulo de posição e tempo de fabricação

Variável	Ângulo de posição	Tempo H/min./seg	Tipo de preenchimento
Velocidade 20mm/s	15°	02:03:43	Concentric
	30°	02:04:26	
	45°	02:04:28	
	15°	02:07:34	Honeycomb
	30°	02:07:52	
	45°	02:08:18	
	15°	02:04:30	Rectilinear
	30°	02:06:22	
	45°	02:06:26	

Fonte: os autores

Com relação a variável velocidade de preenchimento, os resultados são apresentados na tabela 4, percebe-se que dos valores utilizados mínimo (20mm/s), médio (40mm/s) e máximo (60mm/s). Do valor mínimo para o médio, dobra o tempo de fabricação representado 100% de acréscimo na

fabricação do corpo de prova, porém, na relação entre médio e máximo o tempo de fabricação não acompanha a mesma relação reduzindo este tempo aproximadamente 40%.

Tabela 4 – Velocidade de impressão e tempo de fabricação

Variáveis	Velocidade mm/s	Tempo H/min./seg	Tipo preenchimento
Ângulo de Posição 15°	20	02:03:43	Concentric
	40	01:05:27	
	60	00:46:02	
	20	02:07:34	Honeycomb
	40	01:07:33	
	60	00:47:32	
	20	02:04:30	Rectilinear
	40	01:05:49	
	60	00:46:16	

Fonte: os autores

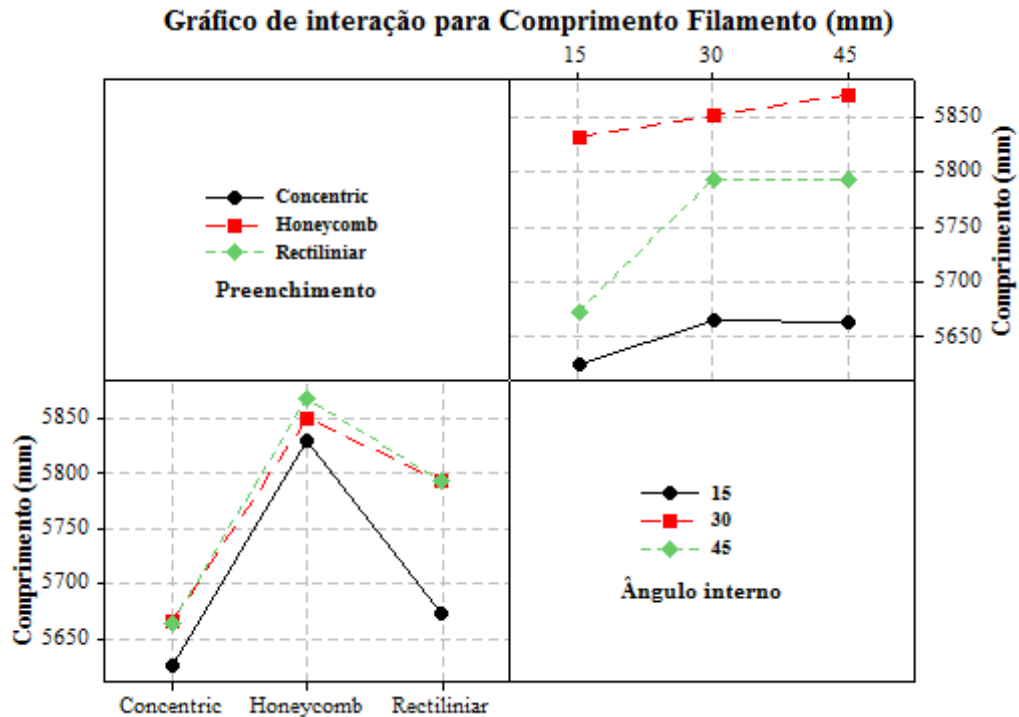
## 4.2 Comprimento de filamentos

A figura 6 apresenta o resultado do comprimento de filamentos utilizados. Observa-se que a variável ângulo de preenchimento interno altera o comprimento de filamento utilizado, dos três níveis utilizados (15°, 30°, 45°) quanto menor o ângulo de impressão, menor será o comprimento de filamento utilizado, este fenômeno é presenciado nas três variáveis tipos de preenchimento (Concentric, Honeycomb ou Rectilinear).

Outra variável que afeta o comprimento de filamento utilizado, é tipo de preenchimento para o nosso experimento das três variáveis em estudo os resultados demonstram que o preenchimento “Concentric” resulta no menor comprimento de filamento utilizado 5625mm, e a Honeycomb o maior comprimento utilizado 5831. A diferença de filamento utilizado é de 206mm.



Figura 6 – Resultados do comprimento de filamentos utilizados



Fonte: os autores

### 4.3 Resistência mecânica

Os corpos de prova fabricados foram submetidos a ensaio de tração que consiste em submetê-los a um esforço que tende a alongá-los ou até mesmo esticá-lo, até a sua ruptura.

O ensaio de tração foi realizado em uma máquina universal, os resultados deste ensaio são apresentados através de um gráfico que mostra as relações entre a força aplicada e as deformações ocorridas durante o desenvolvimento do ensaio.

Um dos resultados obtidos com este ensaio foi o limite de resistência à tração que é a tensão no ponto máximo da curva tensão-deformação. Esse ponto corresponde à tensão máxima que pode ser suportada por uma estrutura sob tração, se essa tensão for aplicada e mantida ocorrerá fratura no material.

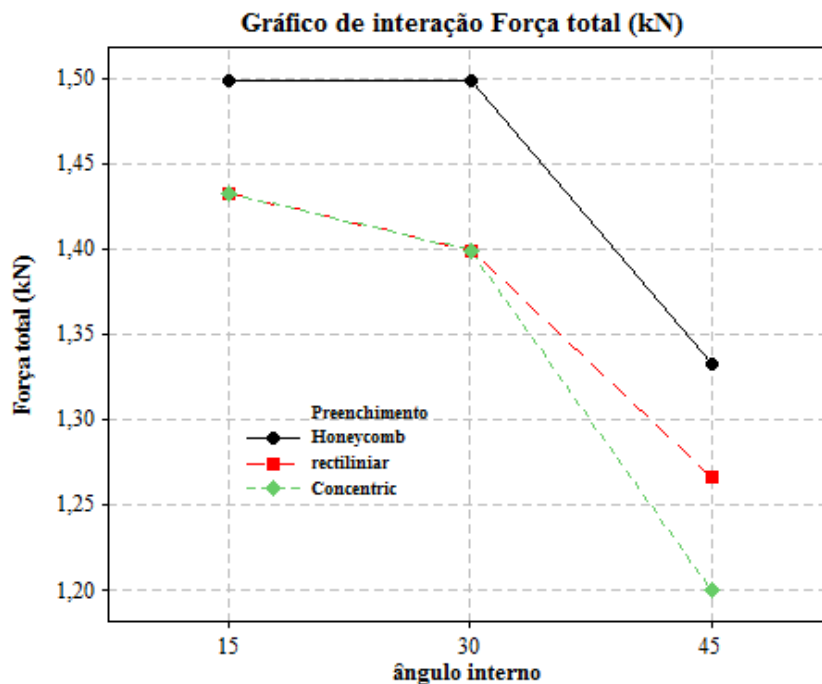
Os resultados ilustrados na figura 7, são os valores de força total necessária para a fratura do corpo de prova em kN. Através do gráfico, percebe-se que a combinação das variáveis: tipos de preenchimento (Retiliniar, Concêntrico e Honeycomb) combinadas com o ângulo de inclinação influenciam na resistência mecânica do corpo de prova em estudo.

Da variável preenchimento os resultados demonstram que a estratégia Honeycomb que suporta maior força antes da ruptura logo após a estratégia concêntrica e retiliniar.

Percebe-se que a mudança da variável ângulo de inclinação interna de 15° para 30° não demonstra ser significativo, o valor de ruptura são muito próximos uma variação de 3%.

Observa-se também que quanto maior o ângulo de inclinação, menor a força utilizada para a ruptura do corpo de prova. Ou seja, quanto maior o ângulo de inclinação, mais frágil é o corpo de prova. Esta variável altera aproximadamente 20% da força total necessária para a fratura do corpo de prova.

Figura 7 – Gráfico de força (kN)



Fonte: os autores

Outro resultado analisado foi à tensão de escoamento (Mpa), que é a tensão máxima que o material suporta ainda no regime elástico de deformação, se houver algum acréscimo de tensão o material começa a sofrer a deformação definitiva.

Os resultados ilustrados no gráfico da figura 8 apresentam no eixo das ordenadas os valores de tensão de escoamento (Mpa) e no eixo das abscissas as variáveis do ângulo de inclinação (15°, 30° e 45°). Observa-se que existe uma tendência de diminuir o valor de tensão de escoamento à medida que é alterado o ângulo interno de preenchimento.

Este fenômeno fica evidente quando se analisa o preenchimento Concentric, com ângulo de inclinação de 15°, os resultados de tensão de escoamento são de 28,90 Mpa, quando aumenta o ângulo para 30° a tensão de escoamento é de 28,20 Mpa, resultando em 2,5% de diferença entre elas não apresentando uma alteração significativa. Já com o ângulo de inclinação de 45° o resultado de tensão de escoamento diminuiu para 23,13 Mpa resultando em 20% de diferença. Assim, a combinação destas variáveis influencia no valor final de tensão de escoamento. Na tabela 5 apresenta os resultados estatísticos das variáveis em estudo

Tabela 5 – Velocidade de impressão e tempo de fabricação

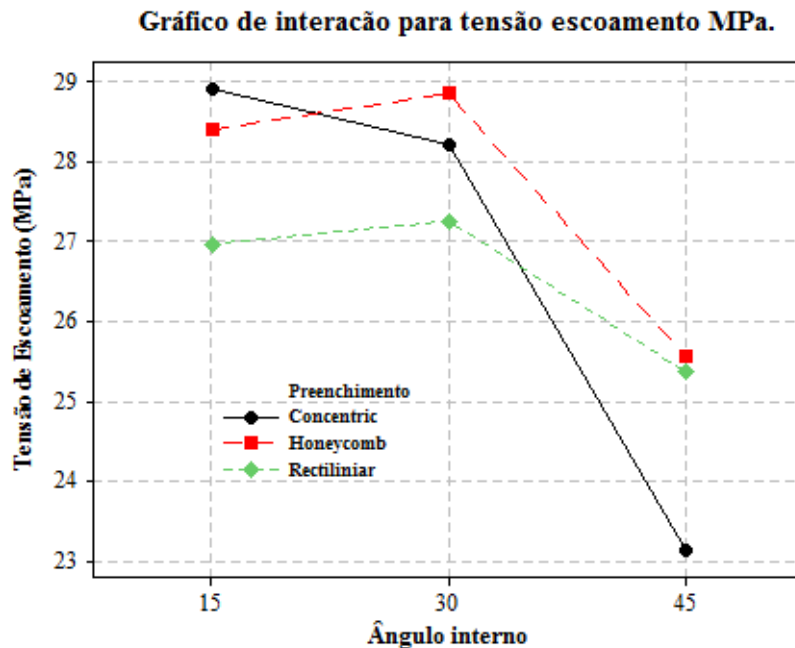
**ANOVA de dos factores: kN vs. Preenchimento; ângulo interno**

Fonte	GL	SC	MC	F	P
Preenchimento	2	0,049630	0,0248148	7,52	0,003
ângulo interno	2	0,191852	0,0959259	29,07	0,000
Error	22	0,072593	0,0032997		
Total	26	0,314074			

S = 0,05744 R-cuad. = 76,89% R-cuad. (ajustado) = 72,68%

Fonte: os autores

Figura 8 – Gráfico de tensão de escoamento



Fonte: os autores

Após a executar análise estatística ANOVA, conclui-se que as variáveis ângulo de inclinação interna e tipo de preenchimento afetam a resistência mecânica do corpo de prova. Os valores de “P” ficaram abaixo do valor estabelecido  $\geq 0,05$  aceitando a hipótese de  $H_0$ .

Quanto menor o ângulo de inclinação do corpo de prova, maior será a resistência mecânica e a tensão de escoamento em todas as três tipos de preenchimentos.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conclui-se desta forma, que a manufatura aditiva é uma tecnologia que auxilia no desenvolvimento de novos produtos, pois permite produzir protótipos físicos a partir de arquivos CAD 3D (Computer Aided Design) com objetivos de testá-los ou apresentar aos clientes ou ainda fabricar produtos personalizados, assim, é importante a realização de estudos para a melhoria deste processo.

Além disso, o desenvolvimento deste projeto foi importante para a formação dos bolsistas, pois devido à sua complexidade, foi possível vivenciar o meio industrial, através da prática de prototipagem e a vivência nos laboratórios de materiais, projetos e fabricação mecânica, contribuindo desta maneira para a sua formação tecnológica e científica.

A escolha da combinação das variáveis preenchimento e ângulo de inclinação interna pode resultar na economia de filamento com maior resistência mecânica no produto final.

### Agradecimentos

O presente trabalho teve o apoio do Instituto Federal de Santa Catarina. Os autores agradecem ao IFSC pelo auxílio financeiro ao pesquisador e auxílio financeiro ao estudante bolsista.

## REFERÊNCIAS

A VOZ DA INDÚSTRIA. Tudo o que você precisa para entender a aplicação da manufatura aditiva na indústria. Disponível em: <<http://avozdaindustria.com.br/tudo-o-que-voce-precisa-para-entender-aplicacao-da-manufatura-aditiva-na-industria/>>. Acesso em: 19 out. 2017.

LIZARDO, B. F.; VIEIRA, L. M. G.; MARTINS, A. M.; FARIA, P. E.; RUBIO, J. C. C. Utilização do Método de Taguchi para Estudos da Influência dos Parâmetros de Fabricação nas Propriedades Mecânicas de Peças em PLA Obtidas por Manufatura Aditiva. IX Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Fortaleza, 2016.

MAGALHÃES; VOLPATO; LUERSEN. A Influência dos Parâmetros Construtivos no Comportamento Mecânico de Peças Fabricadas Pela Técnica de Modelagem por Fusão e Deposição (FDM). Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Campina Grande, Paraíba, 2010.

VOLPATO, N. Processo de AM por extrusão de material. In: organização de VOLPATO, N. Manufatura Aditiva: Tecnologias e aplicações da impressão 3D. São Paulo: Blücher, 2017.

VOLPATO, N. Os principais processos de prototipagem rápida. In: VOLPATO, N. Prototipagem Rápida: Tecnologias e aplicações. São Paulo: Blücher, 2006.

VOLPATO, N; CARVALHO, J. de. Introdução à manufatura aditiva ou impressão 3D. In: organização de VOLPATO, N. Manufatura Aditiva: Tecnologias e aplicações da impressão 3D. São Paulo: Blücher, 2017.

## STUDY OF MECHANICAL RESISTANCE IN THE PROTOTYPES MANUFACTURED THROUGH THE FDM PROCESS

**Abstract:** Additive manufacturing is considered one of the pillars of the industry 4.0 and, is a technology that helps in the development of new products, because it allows to produce physical prototypes from 3D CAD files (Computer Aided Design) with the objective of testing them or submit to clients or even manufacture custom products, thus reducing waiting time, therefore, does not exist, for example, the need for construction of molds.. However, this technology presents some limitations, one of them being the scarcity of research related to the geometric errors and mechanical resistance of the products manufactured through the process of deposition of molten material (FDM). In this context, this article aims to present the results of analyzes of the influences of the different constructive parameters on the mechanical properties of the test bodies obtained through the additive manufacturing process by FDM. For that, it was modeled in 3D CAD standard ASTM D638 test body, it was exported in STL (surface tessellation language) files and transferred to the 3D printer Graber I3 TEK3D open architecture and manufactured by the filament-based additive manufacturing process, changing the following input variables: three print speeds (20mm / s, 40mm / s and 60mm / s); three internal printing angles (15°, 30° and 45° degrees) and three types of standard fills (rectilinear, concentric and honeycomb). Thus, nine experiments were generated with three replicates, totaling 27 races. The output variables were the manufacturing times and the tensile strength.

**Key-words:** Manufacturing additive, mechanical properties, FDM