

Características técnicas de compósitos como filamento para impressoras 3D

Ian Hermeto Costa (IC) e Mauro Cesar Terence (Orientador)

Apoio: PIBIC Mackenzie

RESUMO

O mercado de impressão 3D vem crescendo rapidamente desde 2012, entretanto a matéria prima que abastece as impressoras 3D, que são os filamentos, têm pouca variabilidade no mercado, dentre eles os mais utilizados são: políácido láctico (PLA) que é um polímero biodegradável, Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS) outro polímero leve e rígido, e PETG que é uma versão modificada do Politereftalato de etileno (PET), sendo que o G significa que foi modificado com glycol. Este trabalho teve como objetivo o estudo do nanocompósito de polipropileno com oxido de grafeno em relação ao material Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS) e o políácido láctico (PLA). Foram impressos e injetados corpos de prova dos três materiais estudados e em seguida foram realizados ensaios de resistência a tração e impacto. Pode-se concluir com este trabalho que é possível usar o nanocompósito PP com GO para a impressão 3D. Pode-se concluir ainda que o nanocompósito apresentou maior ductilidade quando comparado aos demais. O PLA demonstrou ser um material mais rígido apresentando maior modulo. Em relação a resistência ao impacto, o ABS apresentou maiores valores. Pode-se verificar também que as propriedades mecânicas são aumentadas em corpos de prova injetados quando comparados á corpos de prova impressos (tanto de tração quanto de impacto).

Palavras-chave: Impressoras. Filamento. Nanocompósito.

ABSTRACT

The 3D printing market has been growing rapidly since 2012, however the raw material that supplies the 3D printers, which are filaments, have little variability in the market, among them the most used are: lactic polyacid (PLA) which is a biodegradable polymer, Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) is another light and rigid polymer, and PETG which is a modified version of Polyethylene Terephthalate (PET), where G means it has been modified with glycol. This work aimed to study the graphene oxide polypropylene nanocomposite in relation to the material Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) and lactic polyacid (PLA). Test specimens were printed and injected from the three materials studied and then tensile and impact strength tests were performed. It can be concluded from this work that it is possible to use PP nanocomposite with GO for 3D printing. It can be concluded that the nanocomposite presented higher ductility when compared to the others. PLA has been shown to be a stiffer material with larger modulus. Regarding impact resistance, ABS presented higher values. It can also be seen that mechanical properties are increased in injected specimens as compared to printed specimens (both tensile and impact).

Keywords: Printers. Filament. Nanocomposite.

1. INTRODUÇÃO

Impressão 3D é um método de produção de formas complexas feitas em softwares através da Fusion Deposition Modeling FDM (modelagem por fusão e depósito). Todo o processo começa a partir do modelo tridimensional que precisa ser inserido em um software que irá compilar os dados e sistematizar em camadas, logo após, o injetor de matéria esquentada e extrai o filete plástico e, na medida em que derrete, é injetado em uma base que se movimenta em dois eixos e cria camadas sobrepostas até que o objeto fique pronto.

O mercado de impressão 3D vem crescendo rapidamente desde 2012 com previsão de alcançar o valor de mercado de USD 32.78 Bilhões até 2023 MarketandMarket (2018), entretanto a matéria prima que abastece as impressoras 3D, que são os filamentos, têm pouca variabilidade no mercado, dentre eles os mais utilizados são: poliacido láctico (PLA) que é um polímero biodegradável, Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS) outro polímero leve e rígido, e PETG que é uma versão modificada do Politereftalato de etileno (PET), sendo que o G significa que foi modificado com glycol. A expansão rápida do mercado abre espaço para o desenvolvimento de novos filamentos capazes de atender a maior demanda.

Neste trabalho, é caracterizada e comparada as propriedades mecânicas de filamentos para impressora 3D e injetoras, assim como uma análise de mercado a fim de determinar sua relevância para o desenvolvimento do mercado de impressão 3D.

2. Referencial Teórico

Neste capítulo serão discutidos os principais materiais utilizados hoje no mercado de impressão 3D.

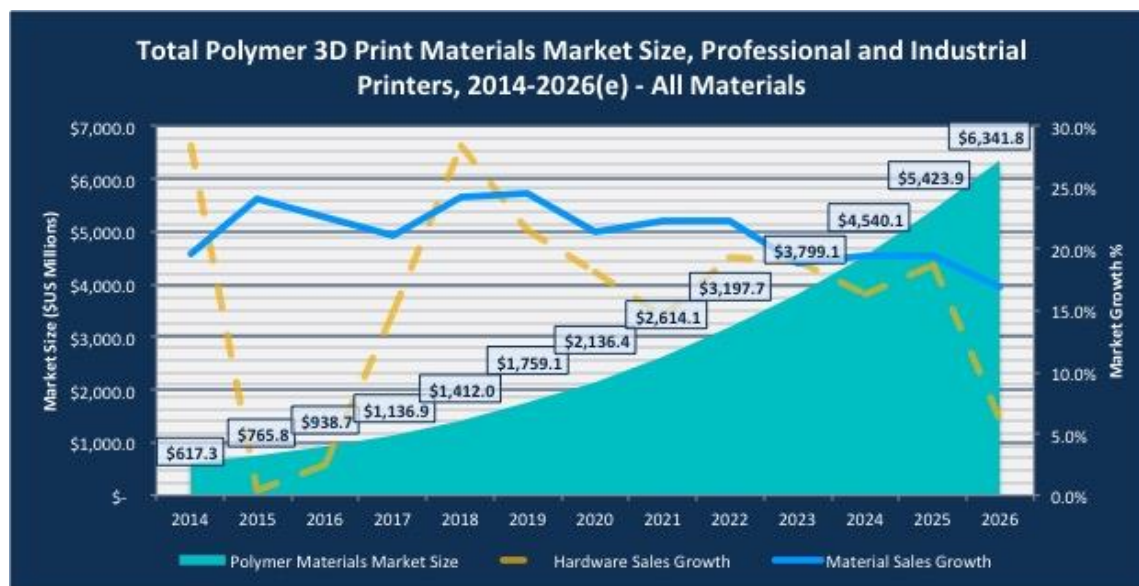
Segundo ANDERSON (2012), estamos passando por uma nova Revolução Industrial, uma vez que a popularização das impressoras 3D está alterando a forma e o modo de produção. Sua flexibilidade nas mudanças de projetos e potencial para redução de custos atrai uma grande variedade de setores da indústria. Desde 2016, 98% dos aparelhos auditivos são produzidos por impressão 3D, escritórios de arquitetura já atraem clientes novos com o prospecto de mostrar o projeto em uma visão tridimensional ao invés de bidimensional. A companhia europeia Airbus também utiliza o método de impressão em seus aviões, o A350 XWB possui mais de 1000 peças impressas por impressoras 3D para reduzir o peso e assim melhorar a eficiência do combustível.

O mercado de impressão 3D está em constante crescimento de pelo menos 40% ao ano desde 2014 (Wohlers, 2019). A inclusão de impressoras 3D em produções de grandes companhias como Airbus e Boeing, que juntas são responsáveis por mais de 88% do market share de aeronaves do mundo, trouxe visibilidade para empresas de menor porte sobre a integração de impressoras 3D em linhas de produção. Em especial a tecnologia FDM (*Fused*

Deposition Modeling) e SLS (Sinterização Seletiva de Laser) foram essenciais para introdução impressão 3D. FDM possui a maior parte do mercado com 66% das vendas de impressoras, isto deve-se a suas características de baixo custo e facilidade de manuseio que possibilita o uso corporativo ou pessoal. Já SLS dispõe de um maior custo de entrada e produção, mas apresenta maior qualidade e acabamento em suas peças que traz maior destaque para empresas de venda de produtos com maior valor agregado com a automobilística ou a aeronáutica.

O relatório publicado pela ABRASDISTI (Associação Brasileira da Distribuição de Tecnologia da Informação) indica que o segmento de materiais dominante da impressão 3D é a dos polímeros com 84% de participação. Este destaque deve-se a versatilidade e baixo custo de adesão, que possibilitam a fácil integração em linhas já existentes ou a criação de novos processos de customização e prototipagem de produtos. Segundo uma pesquisa realizada pela Sculpteo, prototipagem, customização e flexibilidade representam 57% das razões para compra de uma impressora 3D, características que em sua maior parte só conseguem ser viáveis ao combinar a versatilidade da impressão FDM com o baixo custo dos polímeros, o que demonstra sua popularização em anos recentes. Uma previsão feita pela Smartech indica que o crescimento do mercado de polímeros para impressão 3D deve atingir 2 bilhões de dólares em 2020 e chegar a 6 bilhões em 2026.

Figura 1. Tamanho de Mercado de polímeros



Fonte: (Sculpteo, 2017)

O mercado de polímeros para impressão 3D consegue ser dividido entre partes de PLA, ABS e PET com maior participação do PLA com 73% do market share. A dominância do PLA deve-se ao seu baixo custo, atóxicidade e facilidade de realizar acabamento. A tabela 1

mostra as diferentes propriedades dos plásticos com maior dominância no mercado e a tabela 2 faz uma análise comparativa entre os plásticos, elevando os pontos fortes e fracos de cada um.

Tabela 1. Propriedades Filamentos

Material	PLA	ABS	PET
Nome Químico	Poliácido láctico	Acrilonitrila butadieno estireno	Politereftalato de etileno
Temperatura de fusão (°C)	185	220	240
Transição vítrea (°C)	60	105	62
Índice de fluidez (g/min)	6,09	43,1	1,43
Densidade (g/cm ³)	1,26	1,04	1,34
Solubilidade	insolúvel em água	insolúvel em água	insolúvel em água
Market Share	73%	9%	10%

Fonte: (Infocoll, 2019)

Tabela 2. Prós e Contras plásticos

PLA	
Prós	Contras
• Acabamento liso e com brilho • Atóxico • Baixo Custo • Material biodegradável • Variedade de cores	• Pouca adesão entre camadas • Material altamente higroscópico
ABS	
Prós	Contras
• Alta Resistência térmica • Baixo Custo • Variedade de cores	• Pouca adesão entre camadas • Acabamento sem brilho • Material degradável a exposição de luz • Material higroscópico

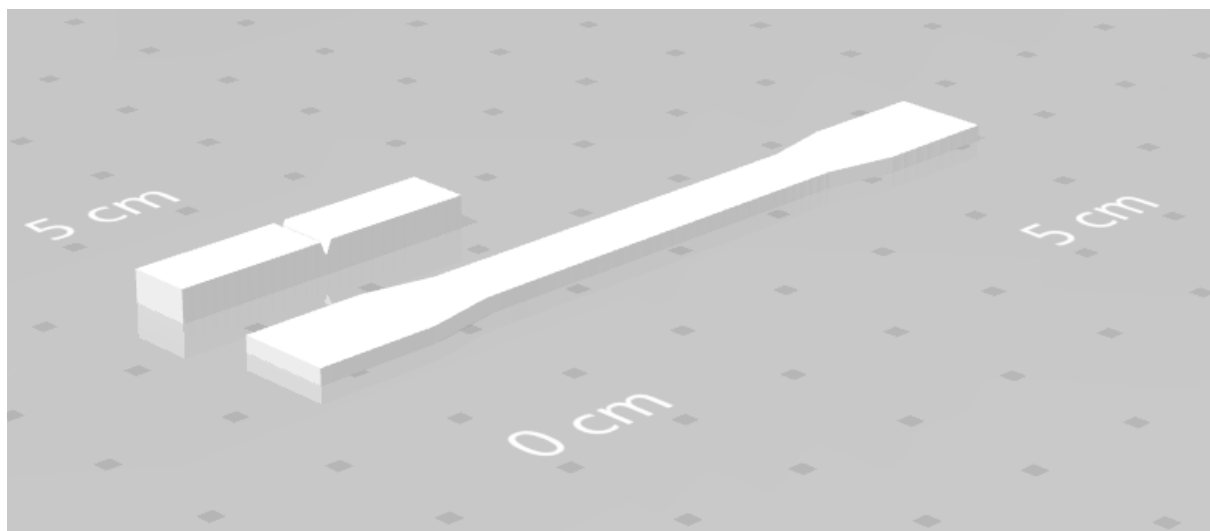
PET	
Prós	Contras
- Alta Resistencia mecânica - Material translucido	- Custo médio - Limitação de cores - Acabamento superficial inferior

3. METODOLOGIA

3.1 MODELAGEM DE CORPOS DE PROVA

Através do software para CAD, SolidEdge, foram modelados corpos de prova de: resistência a impacto de plásticos, de acordo com a ASTM D256-10, e de propriedades de tração de plásticos, de acordo com a ASTM D638.

Figura 2. Desenho dos corpos de prova



3.2 INJEÇÃO DE CORPOS DE PROVA

Foi utilizado a injetora: minijet Pro da Termofisher para realizar para injetar 15 de tração e 15 corpos de prova de impacto para cada material listado na tabela 3.

Os parâmetros de injeção estão identificados na tabela 3.

Tabela 3. Parâmetros de injeção

	PLA	ABS	PP+GO
Temperatura do Molde (°C)	70	70	50
Temperatura do Cilindro (°C)	220	190	250'
Pressão de Injeção (MPa)	400	150	160
Contrapressão (MPa)	200	120	120
Tempo de Injeção(s)	25	20	20
Tempo de compressão (s)	15	12	12

3.3 IMPRESSÃO DE CORPOS DE PROVA

Foi utilizado a impressora SETHI3D S3 e o programa Repetier-Host para realizar impressões de corpos de prova. Durante todas as impressões foi utilizado o spray fixador para assegurar que o material pudesse assentar com maior facilidade no vidro.

Existem 3 configurações principais para a determinação de parâmetros de impressão ao utilizar o software Repetir-Host: Configuração de Impressora "Print Settings", Configuração de Filamento "Filament Settings" e Configuração de Impressora "Printer Settings". Todas as configurações apresentam parâmetros pré-determinados de fábrica para ABS, PLA e PETG. Com o intuito de estabelecer os melhores parâmetros de impressão no ambiente do laboratório e com os filamentos fornecidos, foi estabelecido as configurações pré-determinadas como padrão e foram feitas alterações conforme os resultados testes até que o espécime estivesse de acordo com a norma técnica e acabamento desejado. Foi feita a impressão de espécimes em poliacido láctico (PLA), Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS) e um filamento desenvolvido com polipropileno e óxido de grafeno.

3.3.1 ESPECIME PLA

Para os corpos de tração e impacto PLA, pesquisas bibliográficas e teste iniciais mostraram que a utilização de camadas maiores iria diminuir o tempo de impressão e

aumentar a resistência a tração, logo foi utilizado a configuração de impressão PLA300 (Layer Height 0,3 mm) ao invés da PLA100(Layer Height 0,1mm), informada na tabela 4.

Tabela 4. Configurações PLA

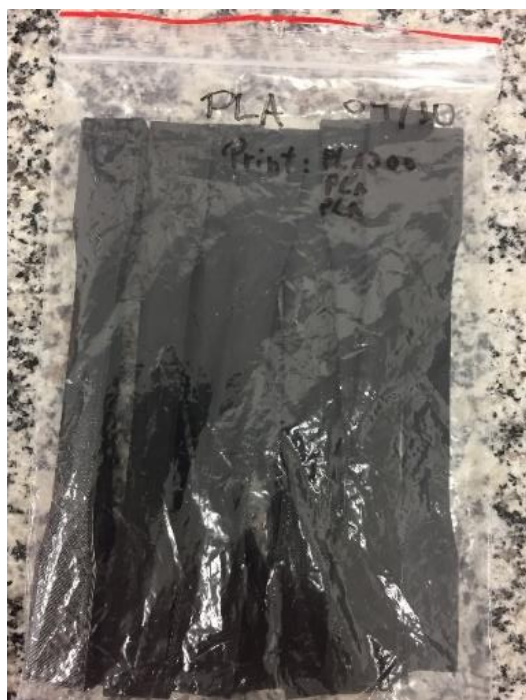
Config	Nome
Print	PLA300
Printer	PLA
Filament	PLA

A tabela 3 traz os tempos e números de peças impressas em PLA e figura 3 exemplifica o resultado final.

Tabela 5. Número de peças PLA

Tipo de corpo	Tempo de impressão (h)	Nº de peças
Tração	2,5	15
Impacto	7,5	15

Figura 3. Corpos PLA



3.3.2 ESPÉCIME ABS

Testes iniciais demonstraram uma variedade e problemas com a impressão deste corpo. Utilizando configurações base de ABS, o corpo apresentava pouca aderência entre as camadas primárias, bordas com acabamento ruim e pouca homogeneidade entre camadas, causando falha estrutural no espécime.

Foram conduzidos testes secundários atacando cada problema diretamente. Ao aumentar a temperatura de extrusão o acabamento ruim das bordas foi eliminado. Ao diminuir a diferença de temperatura entre a cama e a extrusora e aumentar a distância de retração do filamento o espécime apresentou aderência aceitável entre as camadas iniciais, no entanto, a pouca homogeneidade entre as camadas persistiu. Diferentes testes com temperatura de extrusão e caudais “Flow Rate” foram realizados, mas a situação permaneceu a mesma.

O problema foi identificado como sendo o acúmulo de umidade do filamento por estar exposto por grande quantidade de horas em um ambiente aberto. Foi feita a troca do filamento exposto por um novo e conduzidos novos testes. A figura 4 mostra o resultado das impressões, a tabela 6 mostra as configurações utilizadas na impressora e a tabela 4 mostra os números de peças impressas.

Figura 4. Corpos ABS



Tabela 6. Configurações ABS

Config	Nome
Print	ABS300
Printer	ABS
Filament	ABS

Tabela 4. Número de peças ABS

Tipo de corpo	Tempo de impressão (h)	Nº de peças
Tração	2,5	15
Impacto	7,5	15

Foi constatado que ao aumentar a temperatura da cama de 110 ° C para 120 ° C na primeira camada e 115° C nas próximas camadas, houve uma melhora de remoção do material após a impressão, no entanto o spray fixador começa a perder suas propriedades em alta temperatura, assim foi aumentada a reposição de fixador para cada 2 peças. Também foi constatado que a ventoinha provocava pequenas alterações no ABS quando utilizada temperaturas maiores, assim foi feito o desligamento dela durante o processo. Ambos são encontrados em “*Filament Settings*”, conforme as figuras 4 e 5.

Figura 4. Mudança na configuração da temperatura

Filament

Color:

Diameter: mm

Extrusion multiplier:

Temperature (°C)

Extruder: First layer: Other layers:

Bed: First layer: Other layers:

Optional information

Density: g/cm³

Cost: money/kg

Figura 5. Mudança na configuração da ventoinha



3.3.4 ESPÉCIME PP+GO

Foram utilizadas múltiplas configurações de impressão para o corpo, no entanto foi detectado uma má adesão entre as camadas com múltiplas configurações, comprometendo a integridade dos corpos de prova. Foi possível imprimir sete corpos de prova para o ensaio de impacto. Este problema se intensifica ao aumentar as dimensões dos corpos, tornando possível imprimir apenas dois corpos de prova para o ensaio de tração.

3.4 ENSAIO DE RESISTÊNCIA MECÂNICA

Foram realizados ensaios de tração na maquina universal de ensaios Zwick/Roell Z100, utilizando uma carga de 10kN em uma velocidade de 5 mm/min para todos os corpos de prova.

As figuras 6 e 7 ilustram o tamanho da máquina e sua operação.

Figura 6. Maquina Zwick/Roell Z100

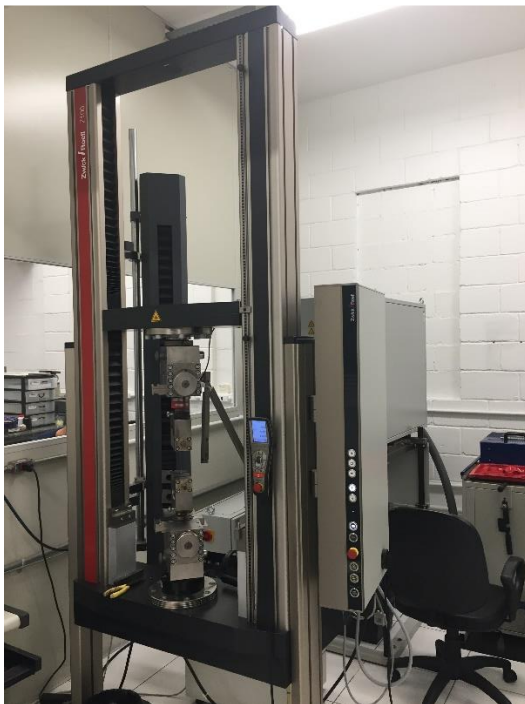
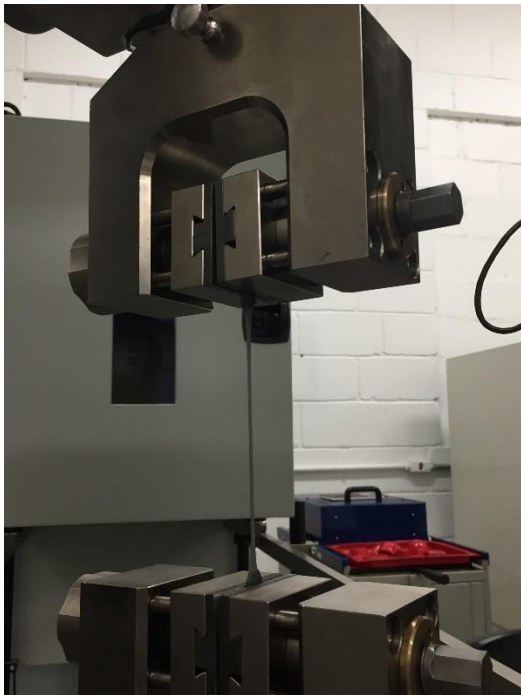
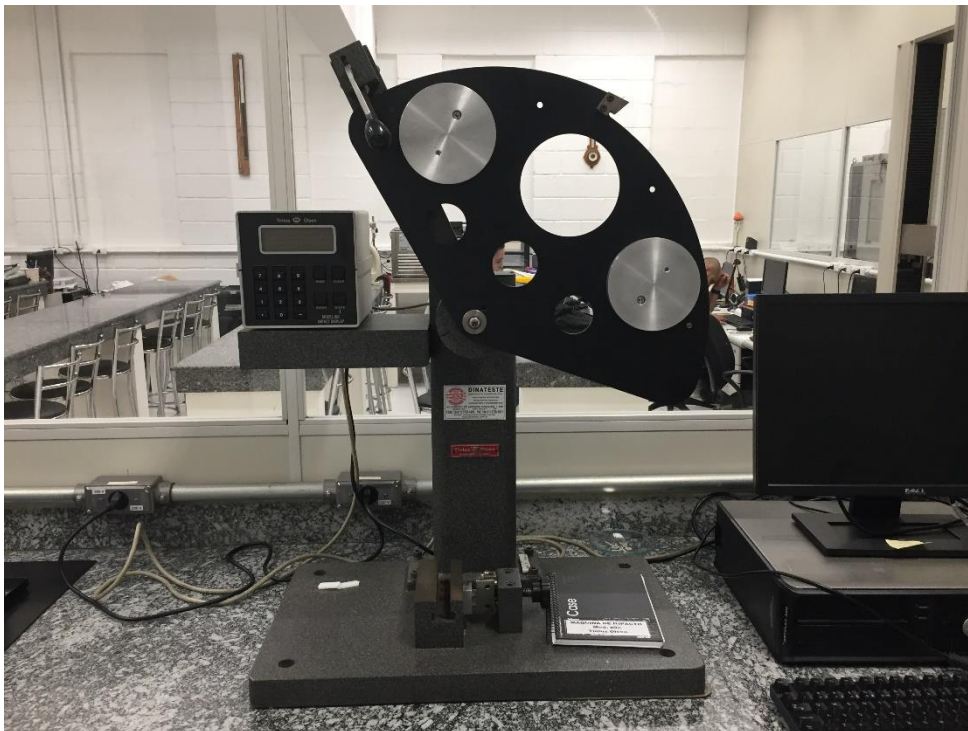


Figura 7. Operação ensaio de tração



Para realização do ensaio de impacto foi utilizado o modelo IT 503 da Tinius Olsen. Neste ensaio o peso utilizado foi de 2,023 kg com uma velocidade de impacto de 3,5 m/s. A figura 8 ilustra o modelo da máquina.

Figura 8. IT 503 Tinius Olsen



4. RESULTADO E DISCUSSÃO

Conforme descrito em materiais e métodos os corpos de prova tanto dos materiais injetados e impressos, foram submetidos a ensaios de resistência a tração e resistência ao impacto. Neste capítulo será apresentado os resultados destas análises.

4.1 ENSAIO DE RESISTÊNCIA AO IMPACTO

O ensaio foi realizado de acordo com a norma ASTM D256-10. Os gráficos abaixo destacam resistência ao impacto dos materiais.

Figura 9. Resistência ao impacto ABS: injetado vs impresso

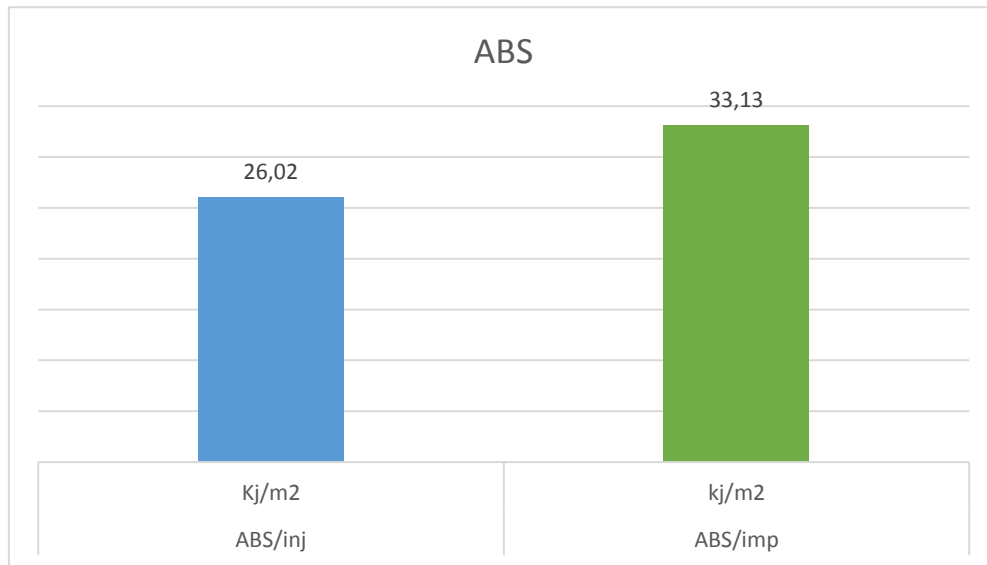


Figura 10. Resistência ao impacto PLA: injetado vs impresso

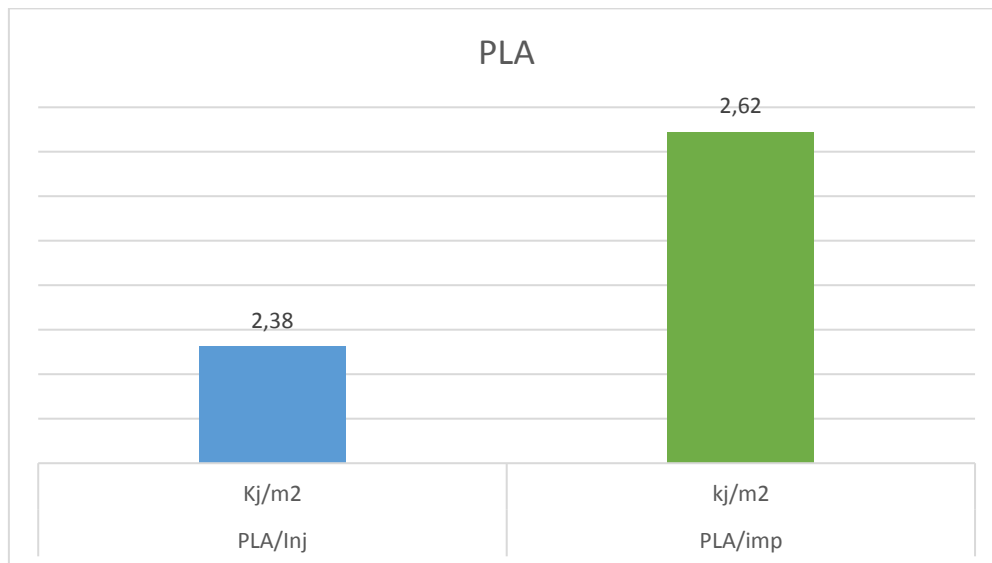
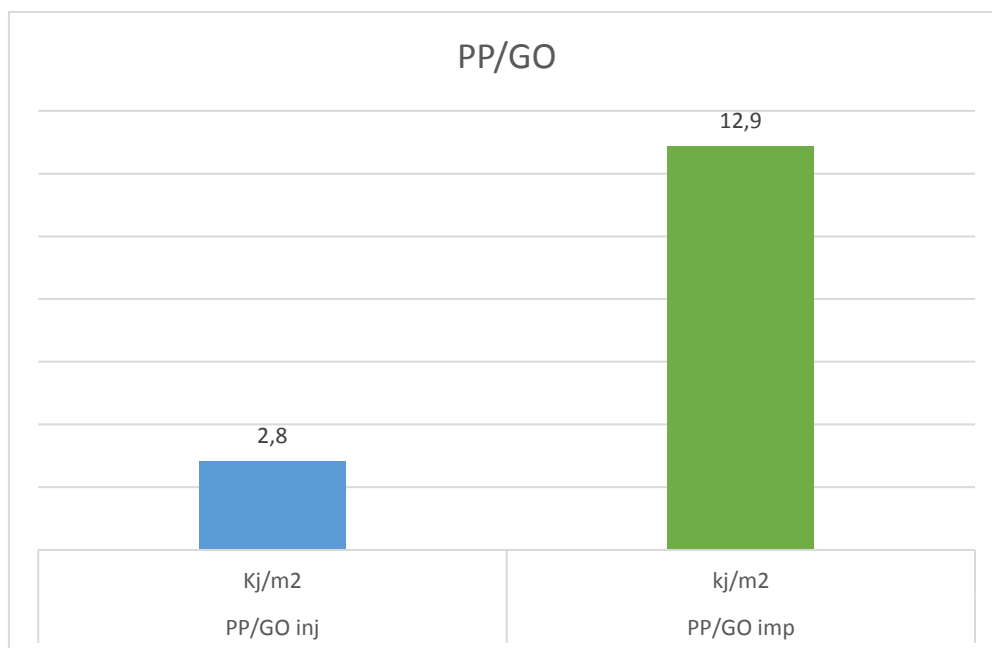


Figura 11. Resistência ao impacto PP+GO: injetado vs impresso



Ao analisar as resistências ao impacto dos corpos de prova impresso e injetado, pode se concluir que tanto o ABS quanto o PLA não apresentaram mudanças expressivas, no entanto houve um aumento, mesmo que pequeno, na resistência ao impacto no material impresso. Isto pode estar relacionado a geometria impressa. Enquanto que em materiais injetados há preenchimento total da cavidade do molde, em materiais impressos a geometria pode modificar propriedades mecânicas. Isto pode ser comprovado com o estudo de elementos finitos em peças impressas.

Quando analisado o corpo de prova de PP com GO, foi observado que o corpo de prova impresso apresentou um aumento significativo em resistência ao impacto. Pode-se relacionar este fato que durante o processo de injeção houve uma aglomeração das nanopartículas, conferindo propriedades anisotrópicas.

As figuras 12 e 13 mostram o comparativo da resistência ao impacto dos materiais impressos e injetados.

Figura 12. Resistência ao impacto corpos impressos

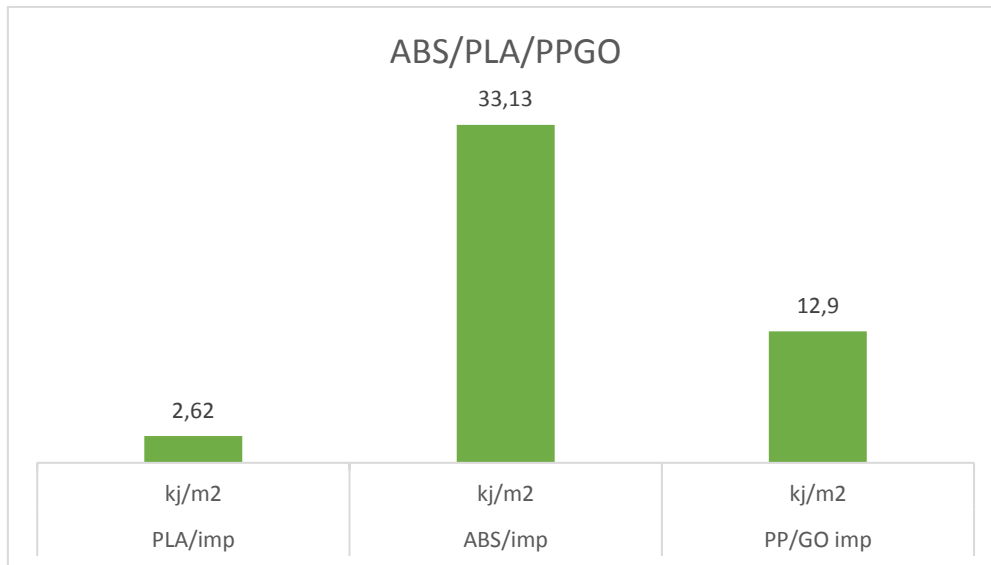
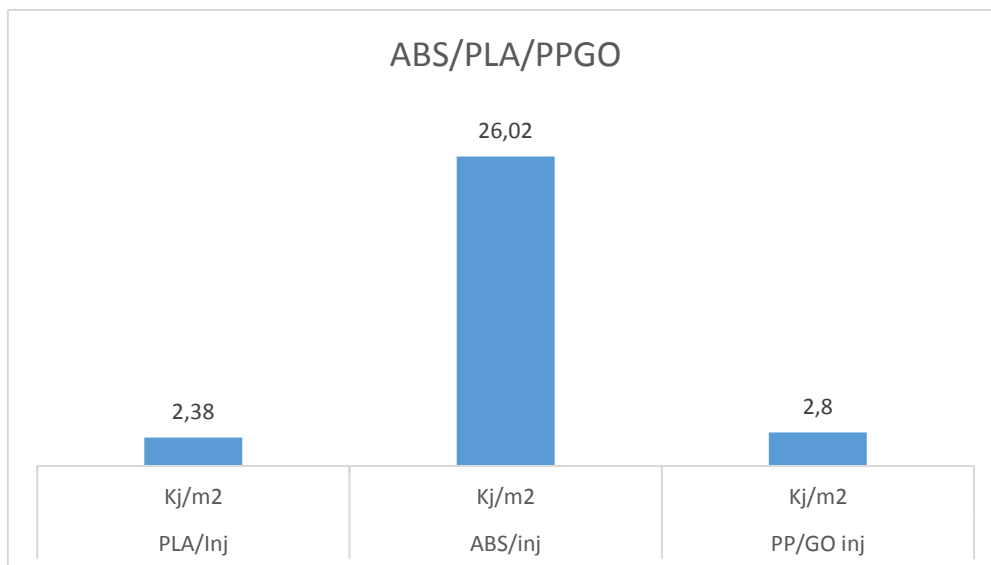


Figura 13. Resistencia ao impacto corpos injetados



O ABS utilizado nos ensaios apresentou maior resistência ao impacto nos corpos impressos e injetados.

4.2 RESISTENCIA A TRAÇÃO

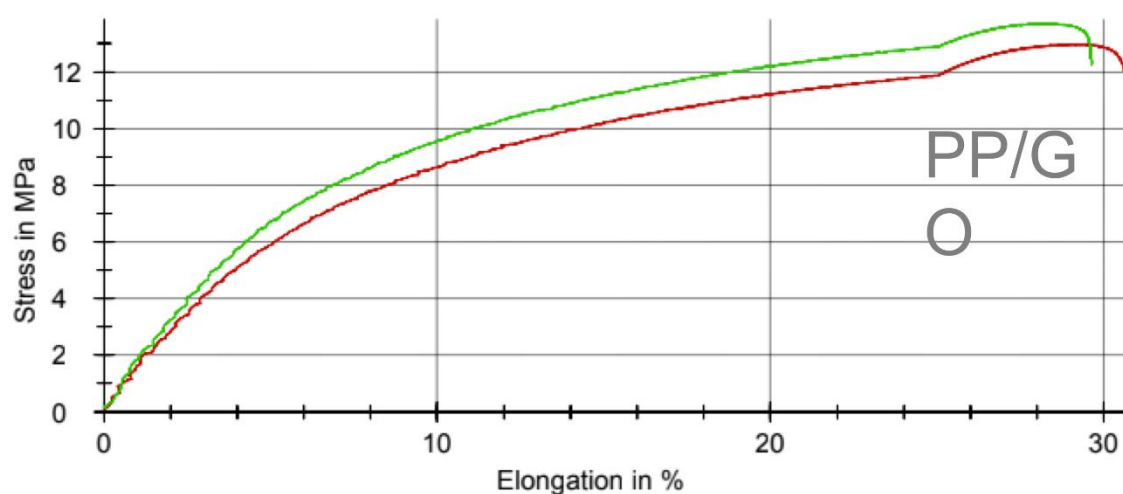
Conforme descrito em materiais e métodos, o ensaio de resistência a tração foi submetido sob a norma ASTM D638, e o resultados foram comparados da seguinte forma:

a) Comparação corpos de prova impresso

Analisando as figuras 13, 14 e 15 pode-se verificar que dentre os 3 materiais estudados, o PP com GO apresentou maior percentagem de alongamento, o que já é

esperado quando se compara PP com ABS e PLA. Por apresentar o maior alongamento até a sua ruptura, pode-se afirmar que dentre os três materiais estudados, o polipropileno apresenta maior ductilidade. No entanto apresentou menor tensão máxima, ou seja, menor resistência a tração. O PLA apresentou maiores valores de tensão máxima e uma percentagem de alongamento parecida com o ABS. Em relação ao módulo elástico, pode-se concluir que o PLA apresentou o maior valor, portanto dos materiais estudados, pode ser considerado o mais rígido.

Figura 14. Resistência a tração PP/GO impresso



Series	E_t	E_{Sec}	σ_{x1}	σ_y	ϵ_y	$\epsilon_{y (Corr.)}$	σ_M	ϵ_M	$\epsilon_{M (Corr.)}$	σ_B	ϵ_B	$\epsilon_{B (Corr.)}$	h
n = 2	MPa	MPa	MPa	MPa	%	%	MPa	%	%	MPa	%	%	mm
x	109	158	7.11	-	-	-	13.3	29	29	12.2	30	30	2.995
s	42.8	1.54	5.21	-	-	-	0.523	0.57	0.45	0.130	0.69	0.57	0.1202
v [%]	39.34	0.98	73.18	-	-	-	3.92	1.99	1.56	1.07	2.29	1.88	4.01

Figura 15. Resistencia a tração ABS impresso

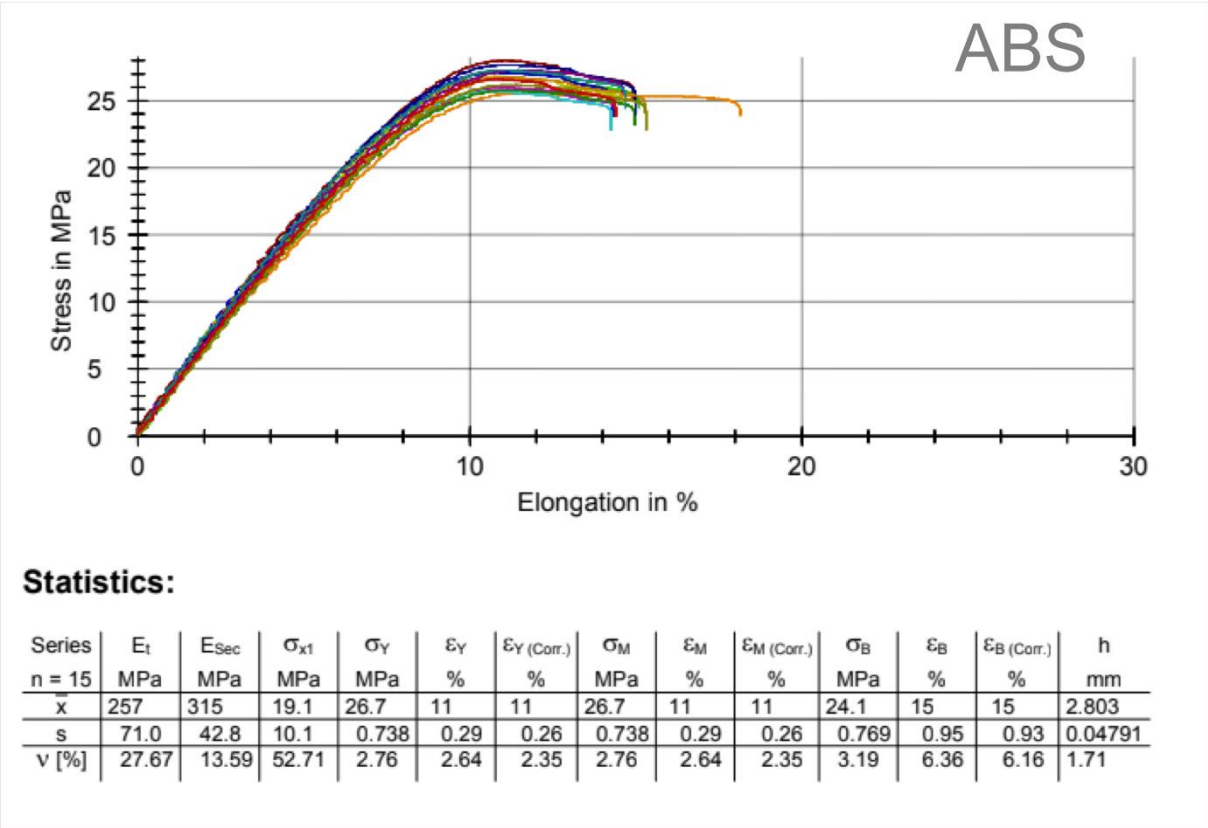
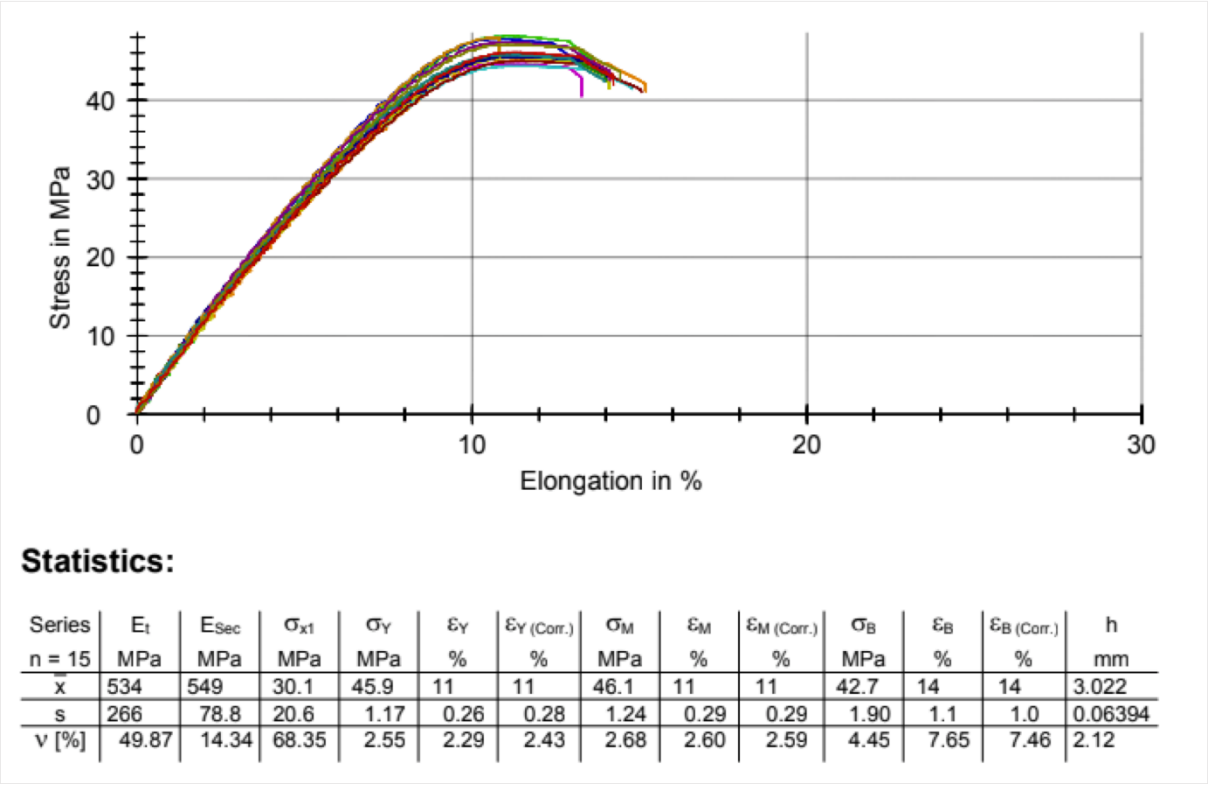


Figura 16. Resistencia a tração PLA impresso

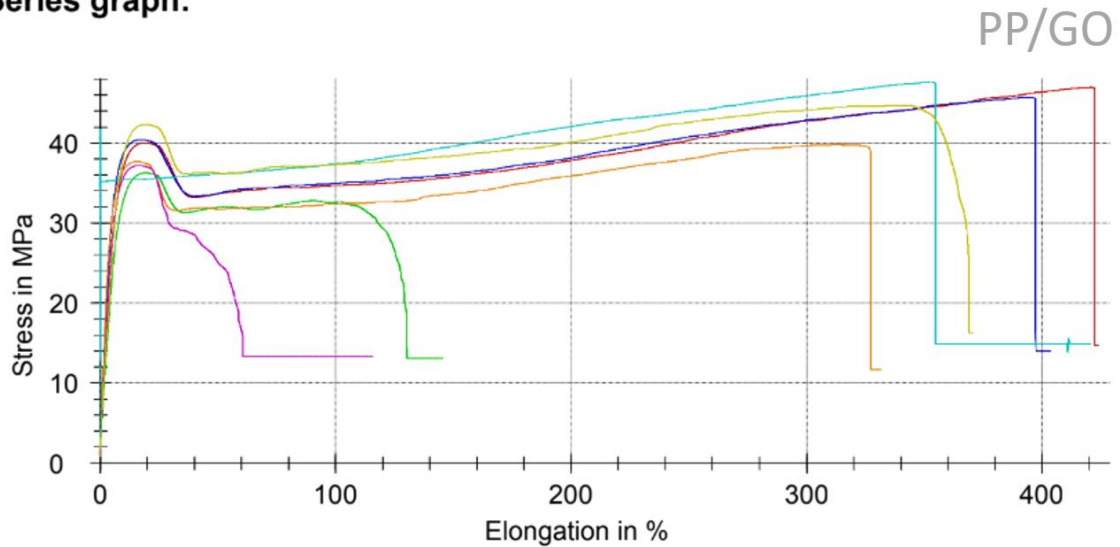


b) Comparação corpos de prova injetado

Analisando os corpos de prova injetados, pode-se perceber as mesmas características entre eles quando impressos porem em escalas diferentes. O PP/GO permanece o material mais dúctil entre os analisados e o PLA o mais rígido, conforme demonstrado nas Figuras 17, 18 e 19.

Figura 17. Resistencia a tração PP/GO injetado.

Series graph:

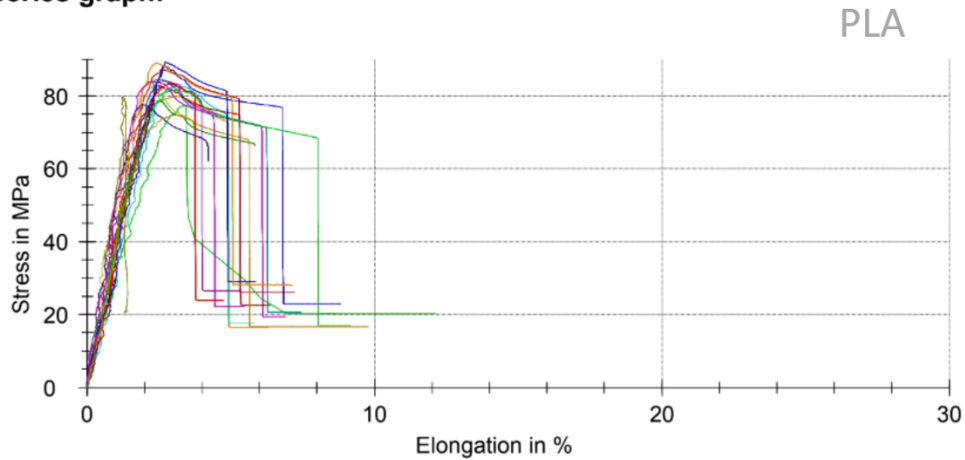


Statistics:

Series	E_t	σ_Y	ϵ_Y	ϵ_Y (Corr.)	σ_M	ϵ_M	ϵ_M (Corr.)	σ_B	ϵ_B	ϵ_B (Corr.)	h	b	A_0
$n = 7$	MPa	MPa	%	%	MPa	%	%	MPa	%	%	mm	mm	mm ²
$\bar{x}$	574	39.4	15	11	-	-	-	-	-	-	3.079	3.273	10.08
s	348	2.33	6.9	19	-	-	-	-	-	-	0.03388	0.0269	0.18
v [%]	-	5.92	-	-	-	-	-	-	-	-	1.10	0.82	1.76

Figura 18. Resistencia a tração PLA injetado

Series graph:

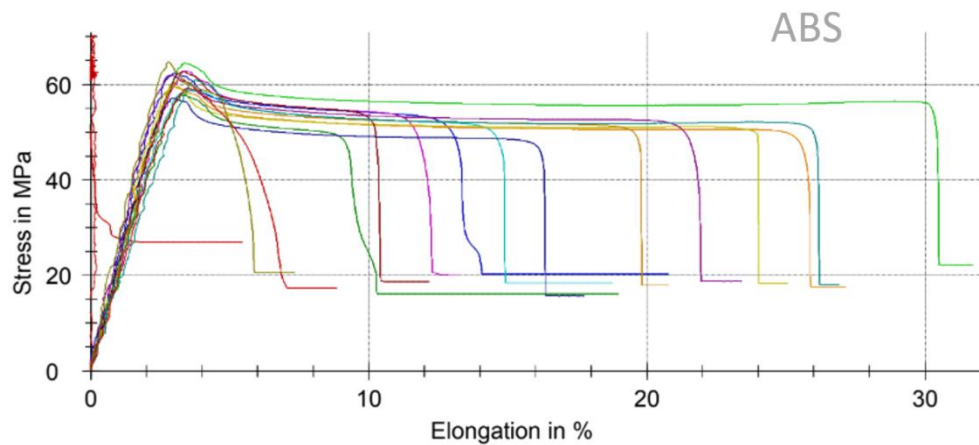


Statistics:

Series	E_t	σ_Y	ϵ_Y	ϵ_Y (Corr.)	σ_M	ϵ_M	ϵ_M (Corr.)	σ_B	ϵ_B	ϵ_B (Corr.)	h	b	A_0
n = 19	MPa	MPa	%	%	MPa	%	%	MPa	%	%	mm	mm	mm ²
x	3550	83.0	2.7	2.7	80.1	1.9	2.0	65.6	4.6	4.7	3.131	3.346	10.48
s	1340	4.09	0.39	0.36	2.88	0.50	0.52	3.06	1.1	1.1	0.04293	0.04247	0.26
v [%]	37.72	4.93	14.58	13.03	3.59	26.11	26.12	4.67	23.57	22.93	1.37	1.27	2.48

Figura 19. Resistencia a tração PLA injetado

Series graph:



Statistics:

Series	E_t	σ_Y	ϵ_Y	ϵ_Y (Corr.)	σ_M	ϵ_M	ϵ_M (Corr.)	σ_B	ϵ_B	ϵ_B (Corr.)	h	b	A_0
n = 15	MPa	MPa	%	%	MPa	%	%	MPa	%	%	mm	mm	mm ²
x	1280	61.5	3.0	3.0	-	-	-	-	-	-	2.997	3.225	9.67
s	2160	3.31	0.83	1.1	-	-	-	-	-	-	0.02712	0.03563	0.16
v [%]	-	5.38	27.68	-	-	-	-	-	-	-	0.90	1.10	1.66

c) Comparação corpos de prova injetado vs impresso.

Quando analisada esta comparação, pode-se afirmar que as propriedades mecânicas são muito mais elevadas em corpos de prova injetados do que impressos.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao termino deste estudo, pode-se imprimir e injetar um nanocompósito de óxido de grafeno e polipropileno. No entanto, são necessários maiores estudos em relação a dispersão da nanocarga no polipropileno. Propriedades como afinidade química ao vidro (plataforma de deposição do impresso) devem ser melhoradas. Segue-se ao termino deste trabalho estudos de elementos finitos com diferentes tipos de geometrias para alcance de melhores propriedades mecânicas de corpos de prova impresso.

6. REFERÊNCIAS

ABRADISTI. **News Context: O mercado de Impressoras 3D em 2017 e perspectivas para 2018**. Disponível em: <<http://www.abradisti.org.br/blog/mercado-impressoras-3d-perspectivas-2018/>>. Acesso em: 05 maio 2019.

ANDERSON, Chris. **A Nova Revolução Industrial**. São Paulo: Elsevier, 2012.

INFOFILL. **Plastics technical data**. Disponível em: <<https://www.innofil3d.com/material-data/>>. Acesso em: 06 maio 2019

MARKET AND MARKET - **3D Printing Market by Offering** (Printer, Material, Software, Service), Process (Binder Jetting, Direct Energy Deposition, Material Extrusion, Material Jetting, Powder Bed Fusion), Application, Vertical, and Geography - Global Forecast to 2023. Publicado em julho de 2017.

SCULPEO. **State of 3D Printing 2017**. Disponível em: <https://www.sculpteo.com/en/get/report/state_of_3D_printing_2017/>. Acesso em: 05 maio 2019.

WOHLER. **Wohlers Report 2019: 3D printing and Additive Manufacturing**. Fort Collins: Wohlers Associates, 2019.

Contatos: ianh.costa@gmail.com e maurocesar.terence@mackenzie.br