



Estudo comparativo de corpos de prova poliméricos (ABS), fabricados por extrusão, injeção e DDM baseado em ensaios de tração

Cavasso PHF*, Paschoalinoto NW*, Lazareti C§, Gregório D* and Bruno DOT*

**Faculdade SENAI de Tecnologia Mecatrônica, São Caetano do Sul, Brasil. §Escola SENAI Mário Amato, São Bernardo do Campo, Brasil.*

Resumo. O estudo se desenvolveu por meio da fabricação e posterior ensaio de corpos de prova confeccionados por meio de *Direct Digital Manufacturing* (DDM), usinagem de placas extrudadas e injeção de polímeros. Um comparativo das propriedades mecânicas obtidas pelos ensaios de tração foi realizada. A avaliação das aplicações de peças DDM, especialmente por se tratar de uma tecnologia relativamente jovem e que ainda não tem todo seu potencial explorado, foi o que motivou a realização desse trabalho. Cada um dos três processos avaliados apresentou particularidades. Os ensaios de peças usinadas e injetadas apresentaram resultados bem característicos, sendo o material usinado mais resistivo à forças trativas do que o material injetado. As peças fabricadas por DDM se mostraram tão eficientes quanto à injeção no ensaio de tração.

Keywords. *Polímeros, DDM, Ensaio de Tração, ABS.*

Introdução. A indústria desde seu surgimento no século XVII é responsável pelo desenvolvimento de novos materiais e processos de fabricação. A inovação é uma das características mais evidentes do meio fabril. Na última década, um processo de fabricação vem se notabilizando como um dos mais revolucionários na produção de peças, desde a inserção do comando numérico computadorizado à usinagem, o *Direct Digital Manufacturing* (DDM), em português Manufatura Digital Direta, popularmente conhecida como impressão 3D (Terceira Dimensão) ou prototipagem rápida. Diferentemente dos processos há décadas já estabelecidos na indústria como a usinagem convencional e os processos de injeção, trata-se de um processo de fabricação por adição de material. É um processo de fabricação através de deposição plástica de material para criação de modelo tridimensional, a partir de um modelo digital (1). O termo DDM é utilizado para definir o processo capaz de fabricar peças de uso finais, ou seja peças acabadas, por meio da adição direta de material (2).

Entre os processos de fabricação de peças poliméricas mais difundidos na indústria se destacam a usinagem e a injeção. São processos que se diferenciam entre si e se distinguem ainda mais do DDM. Segundo (3), a usinagem é definida como o processo de fabricação que confere forma, dimensão e acabamento através da remoção do material sob a forma de cavaco. O processo de injeção, por sua vez, é capaz de produzir peças a partir de um polímero fundido por

meio da injeção forçada desse material em um molde, atribuindo a tais peças forma, dimensão e acabamento.

No universo do desenvolvimento do produto essa tecnologia já é mais difundida e as experiências, especialmente na prototipagem rápida, são um sucesso já que protótipos não necessariamente vão ser submetidos às condições reais de trabalho da peça e, portanto, não precisam das mesmas propriedades mecânicas que a peça final. Destacam-se ainda os baixos custos, que são consequência de não haver desperdício de material e pelo fato do próprio material (o *Acrylonitrile Butadiene Styrene* (ABS), em português Acrilonitrila Butadieno Estireno) normalmente utilizado ser de baixo custo (1).

Esse estudo teve como objetivo realizar ensaios de tração de acordo com (4) e permitir através dos dados colhidos, comparar propriedades mecânicas de três polímeros de composição química semelhantes (ABS), porém com amostras fabricadas por meio de processos distintos. Os processos escolhidos foram usinagem convencional de uma chapa extrudada, injeção e DDM seguindo o método de deposição de material fundido, do inglês *Fused Deposition Modeling* (FDM). Sabendo-se as propriedades mecânicas das amostras pode-se determinar as aplicabilidades de cada material evidenciando as diferenças entre os mesmos.

Existem alguns métodos de DDM aplicados à prototipagem, mas a tecnologia líder de mercado é a FDM. O processo de modelagem por deposição fundida baseia-se na extrusão de filamentos de material plástico aquecido (5). No cabeçote da máquina encontram-se as guias rotativas que forçam a passagem do termoplástico pelos bicos de extrusão aquecidos, depositando o material fundido na plataforma. O cabeçote possui movimento no plano horizontal (XY) e a plataforma no eixo Z. Ainda segundo (5), no processo FDM a peça é construída camada a camada, e ao final de cada uma delas a plataforma desloca-se para baixo (eixo Z) em uma distância igual a espessura da camada depositada (normalmente 0,250mm) variando de máquina para máquina. O cabeçote por sua vez começa a extrudar novos filamentos que são depositados sobre a camada anteriormente depositada. O processo se repete até que a peça seja finalizada. A Fig.1 ilustra o funcionamento de uma máquina FDM.

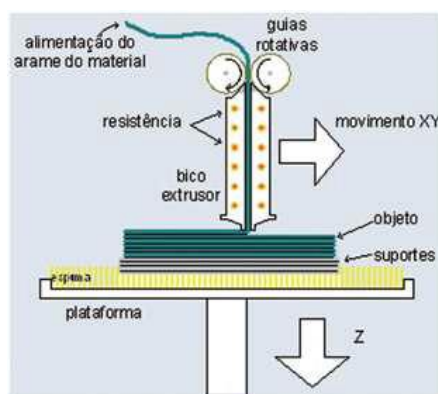


Figura 1. Ilustração do processo FDM (5).

Devido ao recente sucesso do uso dessa tecnologia na construção de protótipos seu uso para fabricação de peças finais vem sendo questionado e aplicado, mesmo que, de maneira



discreta. Na indústria automobilística, por exemplo, diversos dispositivos de montagem, controle, alojamento e dispositivos e ferramentas de geometria simples que antes de tal revolução tecnológica eram feitos por meio da usinagem ou injetados já são feitos por meio do DDM.

Entretanto, a aplicabilidade das peças fabricadas por meio de DDM é uma incógnita, justamente por ser uma tecnologia relativamente recente. Materiais mesmo que de composição semelhantes podem ter propriedades mecânicas muito diferentes entre si o que resultaria em aplicações mecânicas distintas. As propriedades mecânicas do material são definidas pela sua microestrutura, a qual está intimamente ligada ao processo de fabricação (6).

As propriedades mecânicas dos materiais devem ser compreendidas para que seja possível produzir peças úteis, que atendam às necessidades de aplicação, ou seja, o levantamento das propriedades mecânicas se faz fundamental na análise das aplicabilidades de determinado material (6).

Para comparar se a aplicabilidade de peças produzidas por DDM são as mesmas das peças usinadas ou injetadas, precisa-se comparar algumas das propriedades mecânicas destes materiais. Existem incontáveis propriedades que podem ser levadas em consideração na escolha de um material para produção. Entretanto, o mais importante é saber quais as condições de trabalho as quais o produto será submetido e a partir de então, escolher o material que atenda determinada necessidade, como por exemplo uma peça que não será exposta a temperaturas severas e não precisa de um material que possua uma alta resistência térmica (7).

Algumas das propriedades mecânicas são tidas como essenciais para se definir as características de um material de construção mecânica, como a resistência à cargas, ductilidade e dureza. Essas características são determinadas por meio de um ensaio mecânico de tração. Através dele é possível determinar os dados de limite de escoamento, limite de resistência e módulo de elasticidade (7).

O ensaio de tração é um ensaio mecânico que mede a resistência de um material a um carregamento mecânico. As amostras de material são colocadas em uma máquina de ensaios e tracionadas a velocidade constante. O material resiste à deformação até que a carga aplicada seja superior ao limite de resistência do material, que entra em colapso e se rompe. Em uma curva de tensão-deformação é possível avaliar o comportamento do material e extrair os dados para determinar suas propriedades (6). A Fig.2 auxilia na visualização do ensaio.

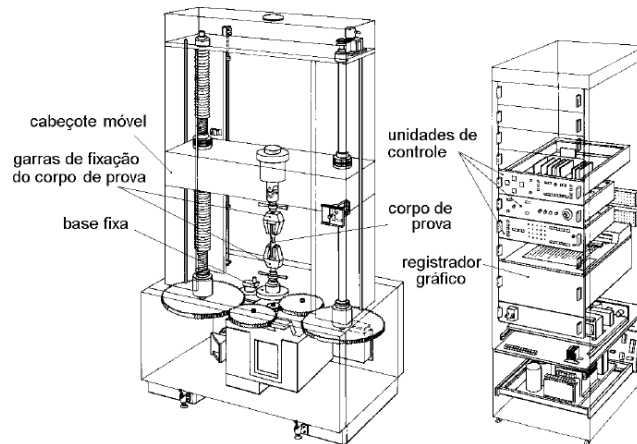


Figura 2. Ilustração de ensaio de tração (6).

Materiais e Métodos. Para a realização dos ensaios de tração foram confeccionados corpos de prova dos três processos estudados: FDM, usinagem e injeção. Para os corpos de FDM e injeção admitiu-se uma tolerância dimensional de mais ou menos 0,5 mm e espessura 3,5mm, seguindo a norma ASTM D638 modelo I. A Fig.3 ilustra o corpo de prova utilizado. A distância entre as garras no ensaio foi de 115mm.

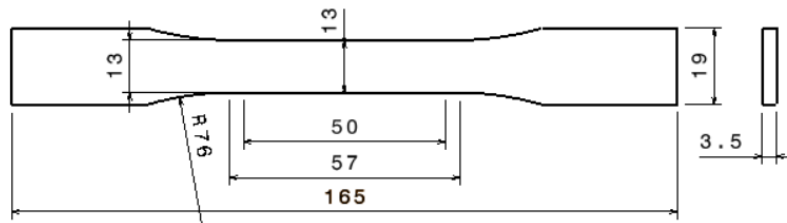


Figura 3. Desenho do corpo de prova padronizado (4).

Devido a variação dimensional e para garantir maior confiabilidade estatística ao estudo, foram feitos dez corpos de provas de cada processo analisado. Desta forma pôde-se realizar os ensaios com um grau de confiança maior no resultado.

Os corpos de prova usinados foram feitos a partir de placas de ABS extrudadas com 4 mm de espessura. Optou-se manter a espessura devido à dificuldade de usinagem encontrada. Para efeito do experimento, utilizou-se para o cálculo de tensão a área de 4mm. As placas quadradas de lado 300 mm foram serradas acompanhando a perfil normalizado e em seguida lixadas apenas para acabamento superficial. A Fig.4 ilustra o resultado final desse processo.

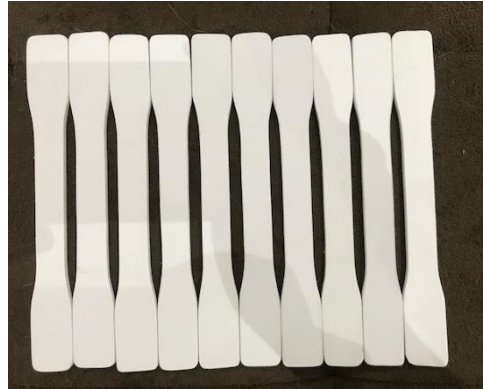


Figura 4. Corpos de prova usinados.

Os corpos de prova injetados foram produzidos com ABS granulado. O processo de fabricação dos corpos de prova foi realizado na unidade do SENAI Mario Amato em São Bernardo do Campo. Para realizar a injeção o primeiro passo foi armazenar o material em uma estufa à 80°C por 24 horas, reduzindo a umidade do material. A injetora para termoplásticos utilizada foi a PPIS 50/30 produzida pela SEMERARO no ano de 1987, conforme a Fig. 5.



Figura 5. Injetora de termoplástico.

Os parâmetros de injeção utilizados durante a produção dos corpos de prova são importantes, pois influenciam diretamente nas propriedades físicas do produto final. Para a produção dos corpos de prova injetados, foram adotados os parâmetros apresentados na Tab.1.

Tabela 1. Parâmetros de injeção.

Parâmetros de Injeção	
Pressão de Injeção	55 bar
Tempo de injeção	4,3 segundos
Tempo de resfriamento	25 segundo
Pressão de recalque	25 bar
Tempo de recalque	1,5 segundos

Outro item relevante e controlado durante o processo de injeção de termoplásticos é a temperatura. Durante a confecção dos corpos de prova foram utilizadas temperaturas de 220°C a 230°C, variando do processo de fundição até o bico de injeção. A Fig.6 ilustra as temperaturas de injeção.

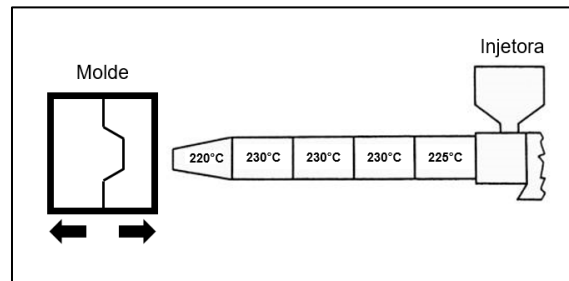


Figura 6. Temperaturas de injeção.

O molde utilizado para injeção foi uma ferramenta própria do SENAI Mario Amato para produção de corpos de prova para ensaios de tração, que atende a norma ASTM D638. É uma ferramenta que possui um ponto de injeção e produz dois corpos de prova por ciclo. A Fig.7 é uma fotografia da ferramenta.



Figura 7. Molde utilizado.

Para a fabricação dos corpos de prova por DDM foi utilizada uma máquina de deposição de material fundido, fabricada pela Factor 3D, modelo GB200AL. O material fundido foi o filamento de ABS premium. A prototipagem foi realizada na empresa TG projetos. A Fig.8 mostra uma foto do processo de DDM realizado.

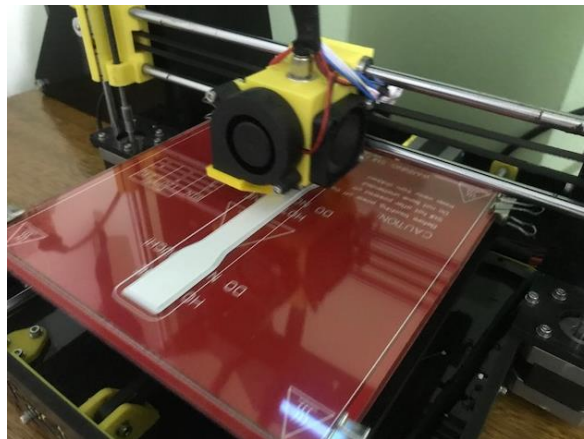


Figura 8. Processo DDM.

Durante o processo de DDM foram definidos alguns parâmetros de fabricação. Esses parâmetros são importantes pois determinam as características mecânicas das peças produzidas, tais parâmetros se encontram na Tab.2.

Tabela 2. Parâmetros DDM.

Parâmetros de DDM	
Altura da camada	0,2 mm
Velocidade de impressão	40 mm/s
Velocidade de impressão (1ª camada)	30 mm/s
Temperatura do Bico	205 °C
Temperatura da mesa	205 °C
Preenchimento	100%

A estratégia de prototipagem adotada foi depositar as camadas de ABS transversalmente ao sentido de tração dos corpos de prova e com um preenchimento de 100% do seu corpo, construindo assim uma peça para ensaio maciça com características dimensionais semelhantes as produzidas por injeção e usinagem. Foram produzidas 10 peças por DDM para realização dos ensaios e cada peça levou em média 40 minutos para ser fabricada. Após a fase de confecção dos corpos de prova obteve-se 10 peças de ABS fabricadas por meio de processos distintos: Usinagem, Injeção e FDM. A Fig.9 evidencia, um ao lado do outro, cada um dos 3 tipos de corpos de prova. O identificado com a letra “A” é o usinado, com a letra “B” o injetado e a letra “C” ilustra o DDM.



Figura 9. Corpos de prova.

Os ensaios de tração foram realizados no laboratório para ensaios de polímeros da Faculdade SENAI Mario Amato em São Bernardo do Campo. Os ensaios foram realizados conforme norma ASTM D638 I. Para realização dos ensaios foi utilizada uma máquina universal de tração fabricada pela empresa Kratos Equipamentos modelo KE10000MP. Foi acoplada a ela um transdutor da mesma fabricante modelo IKCLE3 – USB. Os dados do transdutor foram interpretados por um computador através do software Kratos, TRCv61300 – USB. A figura 10 ilustra o equipamento completo utilizado.



Figura 10. Máquina de ensaio de tração utilizada.

Para realização dos testes foi necessária a inserção de valores de entrada no software, tais como os valores e as unidades de medida para a carga e deslocamento máximo adotado. Outro fator a ser considerado é a velocidade de ensaio. Os valores adotados para esses parâmetros estão expostos na Tab.3. Esses valores basicamente são referentes a escala do gráfico; ou seja, como

será exibido o gráfico resultante ao ensaio. Estes dados foram escolhidos com base no conhecimento prévio de ensaio de materiais poliméricos.

Tabela 3. Parâmetros de ensaio.

Parâmetros de Ensaio	
Carga máxima	30 kgf
Deslocamento máximo	2 cm
Velocidade de ensaio	5 mm/min

A estratégia de ensaio adotada visando uma melhor precisão e confiabilidade nos resultados foi a de se ensaiar sete corpos de cada tipo de produção. De posse dos resultados descartou-se as duas curvas mais destoantes das demais. Assim, com uma população de cinco amostras ensaiadas comparou-se os resultados dos materiais avaliados.

Resultados. Como esperado o material que apresentou maior resistência às cargas aplicadas foi o usinado. As curvas de tração x deformação da Fig.11 demonstram graficamente o comportamento desse material.

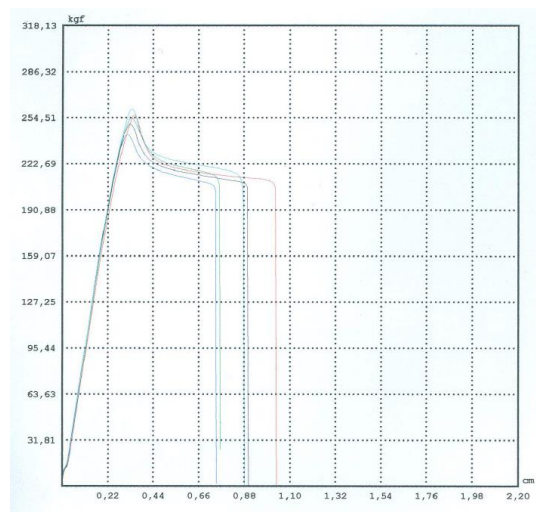


Figura 11. Gráfico de ensaio das peças usinadas.

Ao ser tracionado o material apresentou uma curva característica de ABS produzido por extrusão e posteriormente usinado, com regime plástico longo e uma tensão limite de escoamento elevada, quando comparada a materiais poliméricos. A Fig.12 ilustra os valores obtidos com o ensaio.

Amostra No.	FORÇA MÁXIMA kgf	LIMITE DE RESISTÊNCIA kgf/cm ²	ALONGAMENTO %	MÓDULO DE ELASTICIDADE kgf/cm ²
■ 1	250,20	458,24	12,87	12028,85
■ 2	242,60	444,32	10,66	11663,46
■ 3	254,20	465,57	10,93	12221,15
■ 4	260,60	477,29	12,60	11136,75
■ 5	256,20	469,23	14,80	12317,31
Valor Mínimo	242,60	444,32	10,66	11136,75
Valor Máximo	260,60	477,29	14,80	12317,31
V. Médio	252,76	462,93	12,37	11873,50
D. Padrão	6,80	12,46	1,67	481,90

Figura 12. Resultado do ensaio de peças usinadas.

O segundo material avaliado foi o ABS injetado que por sua vez apresentou um deslocamento e carga máxima menores que usinado. As curvas resultantes do ensaio se encontram na Fig.13.

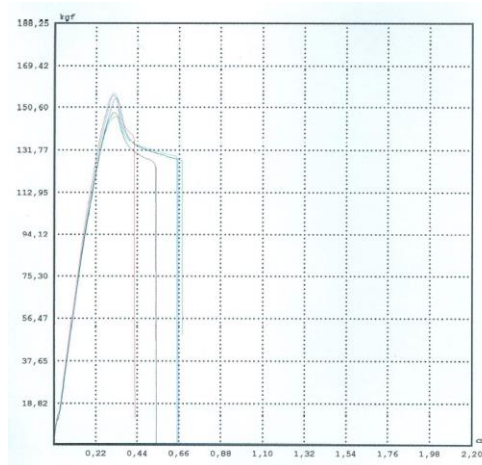


Figura 13. Gráfico dos ensaios das peças injetadas.

Nota-se que apesar do alongamento menor ainda há um deslocamento considerável no especialmente no regime plástico da curva, caso característico para componentes injetados. A figura 14 ilustra os valores dos resultados obtidos.

Amostra No.	FORÇA MÁXIMA kgf	LIMITE DE RESISTÊNCIA kgf/cm ²	ALONGAMENTO %	MÓDULO DE ELASTICIDADE kgf/cm ²
■ 1	148,60	366,91	7,73	9631,48
■ 2	154,80	382,22	9,40	10033,33
■ 3	146,70	362,22	9,71	9508,33
■ 4	157,00	387,65	9,30	11629,63
■ 5	156,00	385,19	6,11	10111,11
Valor Mínimo	146,70	362,22	6,11	9508,33
Valor Máximo	157,00	387,65	9,71	11629,63
V. Médio	152,62	376,84	8,45	10182,78
D. Padrão	4,65	11,49	1,52	848,48

Figura 14. Resultado do ensaio de peças injetadas.

Por fim o último material avaliado foi o DDM por meio de FDM. Esse material apresentou resultados com valores de carga máxima próximos ao material injetado, conforme Fig.15.

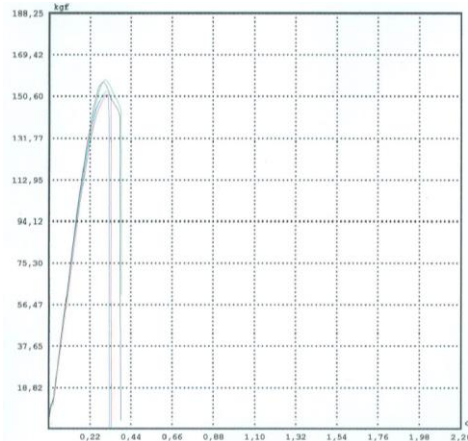


Figura 15. Gráfico dos ensaios das peças DDM

Nota-se uma força máxima muito elevada com valores médios superiores ao injetado. O alongamento, entretanto foi menor que nos demais ensaios, o que resultou em uma curva com regime elástico curto, uma característica destoante dos materiais plásticos convencionais. A Fig.16 ilustra o resultados do ensaio de peças DDM.



Amostra No.	FORÇA MÁXIMA kgf	LIMITE DE RESISTÊNCIA kgf/cm ²	ALONGAMENTO %	MÓDULO DE ELASTICIDADE kgf/cm ²
■ 1	157,00	389,58	5,49	11687,35
■ 2	151,30	375,43	4,66	11263,03
■ 3	157,80	391,56	5,56	11746,90
■ 4	152,60	378,66	4,80	11359,80
■ 5	151,10	374,94	4,80	9842,12
Valor Mínimo	151,10	374,94	4,66	9842,12
Valor Máximo	157,80	391,56	5,56	11746,90
V. Médio	153,96	382,03	5,06	11179,84
D. Padrão	3,21	7,95	0,43	775,06

Figura 16. Resultados do ensaio DDM.

A Tab.4 expõe os resultados obtidos no ensaio de cada um dos materiais.

Tabela 4. Resultados

Valores Médios	Placa	Injeção	DDM
Força Máxima [kgf]	252,76	152,62	153,96
Limite de Resistencia	462,93	376,84	382,03
Alongamento [%]	12,37	8,45	5,06
Módulo de Elasticidade	11873,50	10182,78	11179,84

Conclusões. Após avaliar por meio dos ensaios de tração os três materiais e comparar os resultados obtidos foi possível verificar que os materiais apresentam características distintas entre si e por conta disso suas aplicações também devem ser.

Estas diferenças provavelmente ocorreram dada a diferença de peso molecular nas grades utilizadas (grade de injeção \neq grade de placa \neq grade DDM). A passagem do estado pastoso para o sólido e a condição de escoamento da massa polimérica fundida diferentes podem também terem propiciados respostas diferentes.

Ressalta-se ainda que seria impossível comparar os materiais por si só, pois seria uma análise extremamente rasa e sem teor científico. Apesar de todos eles serem ABS e possuírem composições químicas aproximadas, algumas das características que os diferem, justamente para se adequarem aos processos de fabricação ao qual serão submetidos, fazem com que muitas das suas propriedades sejam alteradas.

As peças usinadas mostraram uma elevada resistência mecânica, suportando um valor médio de carga máxima de 252,76 kgf e uma tensão máxima média de 462,93 kgf/cm². Destaca-se o alongamento médio 12,37% e módulo de elasticidade de 11873,5 kgf/cm². Esses valores evidenciam as propriedades dúcteis do material avaliado, característica apreciada justamente em



peças que receberam algum outro processo posterior como usinagem ou conformações mecânicas.

O ensaio das peças injetadas apresentou uma resistência mecânica e alongamento adequados para uma peça injetada conforme a figura 14.

O ensaio destoante das expectativas geradas foi o ensaio das peças feitas por DDM onde se esperava uma resistência mecânica inferior à que foi apresentada com valores médios de limite de resistência e módulo de elasticidade próximos, mas ainda assim superiores às peças injetadas com baixo percentual do alongamento (5,06%).

Uma das hipóteses para uma peça DDM com propriedades mecânicas inesperadas foi a estratégia de FDM utilizada. A distância entre as camadas de deposição (0,2 mm) menor que os 0,25 mm normalmente praticados. O preenchimento de 100% da estrutura da peça criando um material maciço, também pode ter sido um influenciador. Destaca-se também a estratégia de deposição utilizada, que aplicou o material fundido no sentido diagonal da peça (ângulo de 45° com o sentido de tração da peça), invertendo-se o sentido de aplicação na camada seguinte e assim sucessivamente até a última camada, criando uma trama das camadas aplicadas o que pode ter influenciado positivamente no resultado mecânico alcançado.

O resultado dos materiais estudados apresentou particularidades, fatores contra e a favor a cada um dos processos de fabricação. O estudo realizado evidenciou que as peças produzidas por DDM vão além de apenas peças protótipos, com resultados mecânicos apresentados no ensaio de tração semelhantes ao de peças injetadas, podendo assim serem aplicadas dependendo dos parâmetros de fabricação, e condição de aplicação da peça, para se produzir peças de uso final.

Para baixas escalas produtivas e acabamento superficial menos refinado, o DDM é um processo tão aplicável quanto a injeção para a fabricação de peças do ponto de vista mecânico. O estudo demonstrou que para peças fabricadas a partir de DDM é possível atingir-se valores de tensões máximas, módulo de elasticidade e alongamento semelhantes ao de peças injetadas, desde que seja traçada uma estratégia de prototipagem adequada.

Os resultados apresentados se mostraram eficientes no estudo das aplicações de processos de produção de materiais poliméricos, especialmente no que diz respeito ao DDM. Foi possível evidenciar sistematicamente, baseado no resultado obtido em ensaio normalizado, e em comparação aos demais processos de fabricação quais as aplicabilidades da manufatura digital direta. Para próximos trabalho sugere-se ensaios comparativos entre as diferentes estratégias e parâmetros de DDM, além de outros ensaios mecânicos para comparar outras propriedades mecânicas dos materiais estudados.

Agradecimentos. Agradeço aos meus pais, irmãos e namorada pela compreensão e ajuda prestada ao longo de 18 meses de curso. Aos professores e colegas de classe do SENAI “Armando de Arruda Pereira”, em especial ao professor Nelson Wilson Paschoalinoto pela orientação e ensinamentos compartilhados. Ao coordenador de atividades técnicas Fabiano Caio José e ao professor Clodoaldo Lazareti da Faculdade de Tecnologia SENAI Mario Amato pela disponibilidade de tempo, recursos e conhecimento.



Divulgação. Os autores relatam não haver conflitos de interesse neste trabalho.

Referências.

- (1) Azevedo FM. Estudo e projeto de melhoria de impressão 3D. São Carlos, Universidade de São Paulo (USP), 2013.
- (2) Crump S. Manufatura Digital Direta [Internet]. Stratasys, [s.d.] Acesso em 20 Mar de 2018. Disponível em http://www.lwtsistemas.com.br/wp-content/uploads/direct_digital_manufacturing.pdf.
- (3) Deutsches Institut für Normung. DIN 8580 – Fertigungsverfahren.1985.
- (4) American Society for Testing and Materials. ASTM D638-10: Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics. 2010.
- (5) Aviz A. et al. Construção de Protótipos por adição e remoção de material, comparativo entre deposição ABS x usinagem CNC. Revista Ferramental, Joenville, v. 1, n. 43, p. 23-33, set. 2012.
- (6) Askeland DR.; Wright WJ. Ciência e engenharia dos materiais. 3ª ed. São Paulo: Learnig, 2014.
- (7) Vlack LHV. Princípio de Ciência e Tecnologia dos Materiais. 4ª. ed. Rio de Janeiro: Campus, 1984.