

INFLUÊNCIA DA DENSIDADE DE ENERGIA SOBRE AS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE PEÇAS FABRICADAS EM DIFERENTES PA12 POR SINTERIZAÇÃO SELETIVA A LASER

Murilo Alexandre Fendrich, muriloaf@gmail.com¹

Carlos Henrique Ahrens, carlos.ahrens@ufsc.br¹

¹Universidade Federal de Santa Catarina, R. Eng. Agrônomo Andrei Cristian Ferreira, s/n – Trindade, Florianópolis – SC, 88040-900.

Resumo: A sinterização seletiva a laser (SLS) é considerada uma das mais versáteis tecnologias de manufatura aditiva devido a sua habilidade para processar muitos tipos de materiais. Entre os materiais poliméricos a Poliamida 12 é a mais utilizada. Resultados de pesquisas publicadas na literatura especializada evidenciam que as propriedades finais das peças obtidas por esta técnica dependem de uma composição de variáveis (parâmetros), ajustadas no equipamento, que influenciam o processo de sinterização. Igualmente, as características geométricas e propriedades da PA12 empregada também são apontadas como condições capazes de influenciar na dinâmica de sinterização. Contudo, o conhecimento até aqui obtido a respeito do processo de fabricação com este material baseia-se fundamentalmente em estudos realizados com matérias-primas desenvolvidas especificamente para uso em um dado equipamento comercial. Com a recente expiração dos prazos de proteção de patentes deste tipo de tecnologia, novos fabricantes de equipamentos e de PA12 para SLS têm surgido no mercado, abrindo oportunidade de novas pesquisas e aprimoramento da tecnologia. Este trabalho investigou a influência da densidade de energia, para diferentes potências aplicadas por um laser de CO₂ e diferentes velocidades de varredura, na qualidade (propriedades mecânicas e microestrutura) de corpos de prova fabricados em um equipamento SLS nacional. Foram empregadas PA12 de três diferentes fornecedores. Os resultados foram avaliados em termos de: módulo de elasticidade, tensão máxima, deformação total, densidade aparente e microestrutura. Os resultados mostraram que se mantendo constante a densidade de energia aplicada, aumentando-se simultaneamente os valores de velocidade de varredura e de potência do laser, as propriedades mecânicas apresentaram diferenças em relação à mudança nos valores de módulo de elasticidade, na tensão máxima, na deformação e na densidade aparente. A diferença morfológica das PA12 escolhidas se mostrou como o fator mais influente para as propriedades mecânicas neste estudo.

Palavras-chave: manufatura aditiva, sinterização seletiva a laser, poliamida 12, impressão 3D

1. INTRODUÇÃO

A sinterização seletiva a laser (SLS) é um dos principais processos de manufatura aditiva (MA) da atualidade, no qual o princípio de fabricação permite a obtenção de peças tridimensionais através da fusão seletiva por ação de um feixe de laser, de camadas sucessivas de material presente em um leito de pó. (GAO et al., 2015).

De acordo com Schmid et al. (2014), dentre os materiais poliméricos investigados para uso neste processo de fabricação, a poliamida 12 (PA12) é apontada como sendo a mais apropriada para a SLS e, portanto, é o material que mais vem sendo utilizado. As propriedades finais das peças em PA12 obtidas por esta técnica dependem de uma composição de variáveis (parâmetros), ajustadas no equipamento, que influenciam o processo de sinterização. Igualmente importantes, as características geométricas (morfologia), propriedades e estrutura molecular da PA12, na forma de material particulado (pó), também são apontadas como condições capazes de influenciar na dinâmica de sinterização e nas propriedades mecânicas finais das peças. Apesar de diversas pesquisas apontarem a PA12 como um dos materiais poliméricos mais apropriados para o processo de SLS, o conhecimento até aqui obtido a respeito da fabricação com este material baseia-se fundamentalmente em estudos realizados com matérias-primas desenvolvidas especificamente para uso em um dado equipamento comercial.

De acordo com Caulfield (2006), outra situação recorrente nas bibliografias é tratar o conjunto de parâmetros de processo em termos de um valor de densidade de energia aplicado pelo laser sobre o material, sem, contudo, evidenciar a relação da densidade de energia com a qualidade e propriedades mecânicas das peças fabricadas. Além disso, com a cada vez maior diversificação de fornecedores de PA12 para uso em equipamentos SLS, e a possibilidade de surgir novos fabricantes de equipamentos após a recente expiração de patentes, abre-se uma lacuna para aprofundar as pesquisas nesta área.

2. SINTERIZAÇÃO SELETIVA A LASER (SLS)

Os processos de manufatura baseados na sinterização seletiva a laser seguem uma sequência de etapas que tem início com a modelagem tridimensional e geração de um modelo CAD do objeto que se deseja fabricar. Conforme

ilustrado na figura 1, este modelo computacional é “exportado” em um formato de arquivo denominado *STL* (*Standard Triangle Language* ou *Standard Tessellation Language*) considerado o formato padrão amplamente aceito na indústria da manufatura aditiva. O modelo é baseado em triângulos, que definem os contornos do objeto (DAHOTRE e HARIMKAR, 2008).

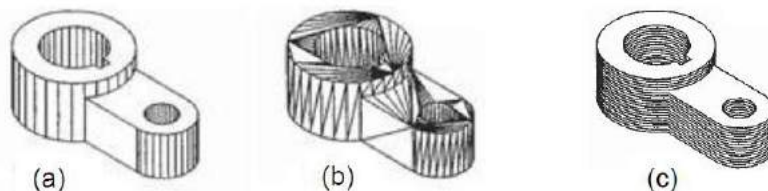


Figura 1. Modelagem tridimensional: (a) Modelo CAD; (b) Arquivo STL; (c) Fatiamento da peça.
Fonte: Dahotre & Harimkar (2008)

O arquivo STL, é então utilizado por softwares especialmente desenvolvidos que permitem que sejam implementados os parâmetros desejados para o processo de fabricação no equipamento de SLS. A figura 2 apresenta um esquema simplificado de um equipamento de SLS. Neste, os objetos são construídos camada a camada partir de um material em pó. O mesmo é espalhado no topo da plataforma de construção, a qual pertence ao conjunto da câmara de fabricação. O espalhador de pó pode ser um rolo ou raspador, usualmente metálico ou de borracha. O pó é fornecido pela elevação da plataforma de alimentação, espalhado e aquecido localmente pelo feixe laser, atingindo a temperatura de fusão nos locais por onde o laser atua, de modo a unir as partículas. Após esta camada ser processada, o equipamento promove a descida de uma altura pré-determinada da plataforma de construção e uma nova camada de pó é depositada, fundida pelo laser e solidificada sucessivamente.

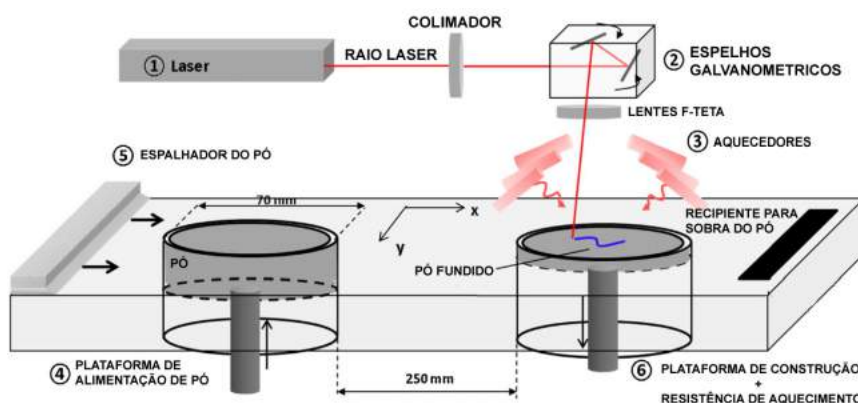


Figura 2. Esquema simplificado de um dispositivo SLS. Adaptado de PEYRE et al., 2015

3. PARÂMETROS DE PROCESSO E DENSIDADE DE ENERGIA NA SLS.

A sinterização seletiva a laser é um processo afetado por uma série de parâmetros, como as propriedades do material, formas geométricas do objeto, e principalmente os de processo. Todos estes parâmetros se inter-relacionam em termos da quantidade e da qualidade de energia sendo direcionada sobre a superfície do pó. Alguns dos principais parâmetros de processo são apresentados nos itens a seguir.

3.1. Potência do laser

De acordo com Gibson et al., (1997), a potência do laser é definida como a quantidade de energia por unidade de tempo que é direcionada pelo feixe laser sobre a superfície do leito de pó. Este parâmetro deve ser definido para assegurar que o pó seja aquecido a temperaturas superiores a de fusão durante a passagem do feixe. A energia total do laser tem fundamental efeito sobre o resultado da sinterização.

3.2. Velocidade de varredura

A velocidade de varredura é definida como a velocidade que o feixe laser é deslocado sobre a superfície do pó (TIAN et al., 2008). Este parâmetro desempenha papel no processo SLS influenciando diretamente no tempo de

fabricação de uma peça. Ao mesmo tempo, o controle deste parâmetro está comprometido com a densificação ou ausência da mesma nas partículas de pó sinterizadas.

3.3. Espaçamento entre linhas

O espaçamento entre linhas é a distância entre dois vetores vizinhos e paralelos no deslocamento do feixe laser. O intervalo de espaçamento entre linhas pode ser inferior, igual ou superior ao diâmetro focal do laser. Assim como o parâmetro velocidade de varredura, este índice é de fundamental importância quando se estuda as tendências de obtenção de peças densas ou porosas (DAHOTRE e HARIMKAR, 2008).

3.4. Espessura da camada

A espessura da camada é um importante elemento no processo de sinterização a laser. A mesma é definida como a profundidade que a plataforma de construção desce a cada fatia do objeto em processo, portanto define a espessura depositada de pó a ser sinterizada em um ciclo do processo. De acordo com Gibson et al. (1997), esta variável está diretamente relacionada ao tempo de fabricação de uma peça e sua rugosidade.

3.5. Representação gráfica dos parâmetros de processo SLS

Os parâmetros de processo explicitados nos itens anteriores podem ser vistos na figura 3, a qual mostra a representação de forma gráfica de como ocorre o deslocamento do feixe laser sobre a superfície do leito de pó na SLS.

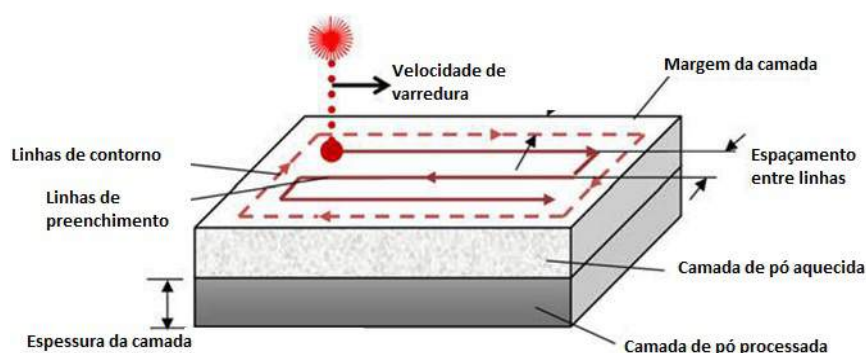


Figura 3. Representação gráfica do deslocamento de um feixe laser sobre o leito de pó no processo SLS.

Fonte: Adaptado de Gibson et al., (1997)

3.6. Densidade de energia

Segundo a definição proposta por Steen (1991), a densidade de energia é uma medida da quantidade de energia fornecida sobre o leito de pó por unidade de área, sendo, portanto, uma função de três parâmetros correspondentes a maneira como o feixe de laser é aplicado. Estes parâmetros são: a potência do laser, a velocidade de varredura, e o espaçamento entre linhas, todos exercendo uma forte influência sobre o comportamento mecânico de peças produzidas por SLS (CAULFIELD, 2006). Baseado nesta definição, a densidade de energia pode ser expressa pela equação:

$$\rho_e = \frac{P}{v \cdot d} \quad (1)$$

onde ρ_e (J/mm²) é a densidade de energia, P (Watts) é a potência do laser, v (mm/s) a velocidade de varredura e d (mm) é o espaçamento entre linhas de trajetória percorrida pelo laser sobre a superfície do leito de pó. A equação (1) mostra que a densidade de energia aumenta com o incremento da potência do laser e decresce com o aumento da velocidade de varredura e espaçamento entre linhas respectivamente (TIAN et al., 2008).

De acordo com Franco et al. (2008), levantamentos mostram que os melhores resultados de resistência de uma peça fabricada por SLS em PA12 são obtidos quando a densidade de energia é mantida entre 0,02 e 0,08 J/mm². Ainda de acordo com o autor, uma vez que cada processo de produção objetiva obter produtos com a melhor qualidade utilizando a menor quantidade de energia possível é desejável que a análise da densidade de energia para o processo SLS, seja combinada a uma avaliação criteriosa das propriedades das matérias-primas utilizadas, ou seja, a densidade de

energia não é recomendada que seja avaliada como um parâmetro isolado no processo, mas o conjunto de parâmetros que levam a esta definição.

4. PROPRIEDADES DA POLIAMIDA 12

Segundo Schmid et al. (2014), a compreensão das propriedades de materiais poliméricos para SLS passa uma avaliação criteriosa de cinco propriedades associadas. Estas propriedades são: características do pó e da partícula assim como comportamentos térmico, óptico e reológico. Estas cinco propriedades podem ser divididas em intrínsecas (térmicas, ópticas e reológicas) e extrínsecas (características da partícula e do pó). As propriedades intrínsecas são tipicamente determinadas pela estrutura molecular do polímero em si e não podem ser facilmente influenciadas, enquanto que as extrínsecas são propriedades controladas pela produção dos pós. Estas propriedades serão apresentadas em maiores detalhes nos itens a seguir.

4.1. Propriedades térmicas

De acordo com Schmid et al. (2014) o entendimento dos aspectos térmicos desejáveis para um material dedicado a SLS deve ser correlacionado com a sequência do processamento SLS. Um laser do tipo CO₂ é utilizado para fundir as partículas de pó depositadas continuamente em finas camadas. A coalescência das partículas na camada superior de pós é necessária assim como a adesão com as camadas fundidas anteriormente. Para polímeros semicristalinos, isto implica que a temperatura de cristalização (T_c) deve ser ultrapassada durante o processo o máximo possível. Além de que a temperatura em que o material é submetido durante o processo deve ser precisamente controlada entre a T_c e a temperatura de fusão (T_f). Este intervalo de temperatura termodinamicamente metaestável é denominado de “janela de sinterização”.

4.2. Propriedades ópticas

Do ponto de vista das propriedades ópticas, para que um polímero possa ser processado por SLS, é necessário que seja capaz de absorver energia no comprimento de onda do espectro infravermelho. Isto é possível visto que em sua grande maioria, os polímeros são compostos por ligações alifáticas (C-H). Os grupamentos alifáticos dos polímeros têm propriedades de alta absorção de energia quando expostos a radiação de 10,6 μm (lasers do tipo CO₂).

4.3. Propriedades reológicas

Além da capacidade da absorção IR, uma baixa viscosidade e uma baixa tensão superficial do polímero são essenciais para o êxito do processamento SLS (Rietzel, 2015). Isto é fundamental para acelerar a coalescência das partículas de polímero. Especialmente, uma baixa viscosidade do fundido a baixas taxas de cisalhamento são importantes, pois, a despeito dos processos de injeção, a SLS não promove forças adicionais durante a fabricação da peça.

4.4. Propriedades da partícula

Segundo Amado (2011), a forma e a superfície das partículas unitárias determinam o comportamento do pó resultante. No caso de pós para SLS, as partículas devem apresentar o melhor formato esférico possível. Isto se deve para favorecer um comportamento homogêneo ao escoamento, assim como permitir distribuição uniforme no leito de pó, uma vez que no processo SLS, a matéria-prima não passa por processos de compactação extras. Ainda segundo Amado et al. (2011), a obtenção de peças densas está diretamente relacionada a densidade do pó a verde no leito de pó e seu comportamento quanto a escoabilidade.

4.5. Propriedades do pó

No que diz respeito aos pós dedicados ao processo SLS, estes devem apresentar certa distribuição do tamanho de partículas. Segundo Schmid (2014), a distribuição favorável recomendada é entre 20 e 80 μm . Entretanto, é necessário identificar não somente o volume, mas também a fração de partículas pequenas. Particularmente, a quantidade de partículas pequenas pode ser responsável pelo comportamento do pó no processamento SLS. Estas propriedades descritas neste capítulo são algumas das razões pela reduzida quantidade de polímeros disponíveis para processamento SLS. A PA12 e alguns outros compostos baseados neste são hoje em dia os mais empregados quando comparados com outros polímeros e isto é também devido ao fato de que equipamentos são otimizados em termos de desempenho para serem utilizados com a PA12.

5. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Neste trabalho foram selecionadas como matérias-primas, PA12 de três diferentes fornecedores, designadas como sendo PA1, PA2 e PA3 conforme mostra o quadro 1.

Quadro 1. Poliamidas utilizadas na pesquisa

Designação	Material	Fornecedor
PA1	PA2200	EOS
PA2	Polymon	Polychroma
PA3	InnovPA 1550	Exceltec

O trabalho foi dividido em duas etapas. A primeira etapa foi a de caracterização das três matérias-primas (PA12) selecionadas para o trabalho. Na segunda etapa foi realizada a avaliação da influência dos parâmetros de fabricação por SLS permeando uma mesma densidade de energia quando obtidas por parâmetros distintos, sendo estes, a) a potência do laser e, b) velocidade de varredura do laser. Foram fabricados corpos de prova para ensaio de tração segundo a norma EN ISO 527 1BA. Os resultados foram avaliados em termos de: módulo de elasticidade, tensão máxima, deformação total, densidade aparente e análise microestrutural na superfície superior dos corpos de prova.

O equipamento utilizado para a fabricação dos corpos de prova foi o equipamento *LaserFunde*, versão protótipo da primeira plataforma nacional de Sinterização Seletiva a Laser, gentilmente cedido pela empresa Alkimat Tecnologia Ltda. Suas características são apresentadas na tabela 1.

Tabela 1. Especificações do equipamento *LaserFunde*.

Característica	Valores
Volume efetivo de fabricação (mm)	φ 110 x 120
Faixa de espessura de camada (μm)	100 a 300
Tipo do Laser e Potência máxima	CO ₂ , 60 W
Velocidade máx. de varredura (mm/s)	Até 2000
Diâmetro do ponto focal (μm)	400
Temp. na plataforma de construção (°C)	130
Atmosfera	ar atmosférico
Potência instalada	1 KW
Interface	Software próprio
Interface CAD	STL

O equipamento *LaserFunde* possui uma câmara de fabricação e nela estão contidas uma plataforma de alimentação e uma plataforma de construção, ambas com volume útil de 1.140 cm³ e um funil de descarte de pó. Dispõe também de um dispositivo espalhador de pós com lâmina de borracha e de dois aquecedores internos na câmara dispostos na parte superior de cada uma das plataformas. Os aquecedores foram utilizados no experimento com acionamento manual no qual o ponto de partida era iniciado quando a medição de temperatura através do sensor atingia a temperatura de 130 °C. O controle de espessura de camada permite que sejam depositadas camadas entre 100 e 300 μm. O software utiliza arquivos STL e foi desenvolvido pela própria empresa. É equipado com um laser do tipo CO₂ de 60W de potência efetivos entregues sobre a plataforma de construção e espelhos defletores do feixe que permitem a utilização de velocidade máxima de varredura de 2000 mm/s.

Seguindo recomendações sugeridas por Franco et al. (2008), um estudo preliminar foi realizado variando a densidade de energia entre valores de 0,02 a 0,09 J/ mm². Neste trabalho a densidade de energia estudada resultante da equação 1, foi de valor 0,08 J/mm² devido as peças produzidas apresentarem sob o ponto de vista qualitativo, boa rigidez e adequado manuseio. As densidades de energia com valor abaixo de 0,08 J/mm² resultaram em peças frágeis e quebradiças e as densidades de energia acima de 0,08 J/mm² apresentaram peças com visível contração e empenamento. As combinações escolhidas para o estudo são as mostradas na tabela 2.

Para facilitação do entendimento os mesmos estão apresentados junto de seus respectivos códigos os quais serão utilizados nos itens seguintes. Neste estudo o valor do espaçamento entre linhas foi mantido constante com valor de 0,5 mm e a câmara de fabricação foi mantida a temperatura de 130 °C. Para cada combinação foram fabricados 5 corpos de prova.

Tabela 2. Parâmetros experimentais selecionados para realização da pesquisa

Potência do laser (W)	Velocidade de Varredura (mm/s)	Código	Densidade de energia (J/mm ²)
30	750	P30V750	0,08
40	1000	P40V1000	
50	1300	P50V1300	

6. RESULTADOS

6.1. Caracterização das PA12

A figura 4 mostra as imagens MEV das três amostras investigadas, as mesmas evidenciaram diferenças morfológicas entre os pós. Enquanto a PA1 é composta por partículas irregulares e com aparente aglutinação, as imagens da PA2 e a PA3 mostram partículas com melhor dispersão e pouco aglutinadas. As amostras de PA1 e PA2 mostram formatos semelhantes ao tipo “batata” e a PA3 com formatos arredondados e de tamanhos proporcionalmente menores.

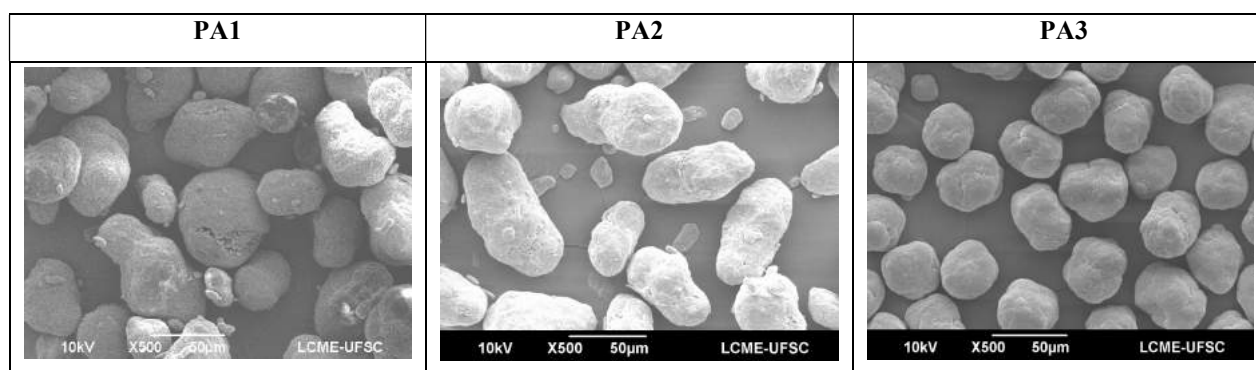


Figura 4. MEV dos três tipos de PA12 investigadas

Os resultados da análise DSC mostraram que a PA1 apresentou temperatura de cristalização (T_c) com pico em 152 °C e temperatura de fusão (T_f) com pico de 192 °C. A PA2 apresentou temperatura de cristalização (T_c) com pico de 162 °C e temperatura de fusão com pico em 190 °C. Já a PA3 apresentou temperatura de cristalização (T_c) de 154 °C e temperatura de fusão de 185 °C. O que evidencia proximidade entre as propriedades térmicas das três poliamidas estudadas, estas diferenças apresentadas podem ser devido a própria calibração do equipamento e também a memória térmica das poliamidas.

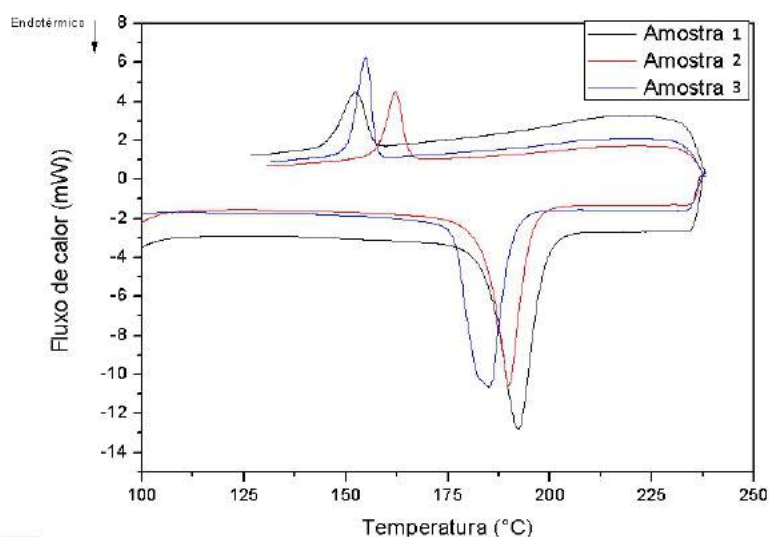


Figura 5. Gráfico da curva de DSC para as três poliamidas 12 investigadas

O gráfico da figura 6 apresenta que no ensaio de distribuição e dos tamanhos de partícula, evidenciou-se que a PA1 possui tamanho médio de partícula de 46,45 μm , com o valor de D10 sendo 32,48 μm , D50 de 44,70 μm e D90 de 62,78 μm , a PA2, tamanho médio de 66,72 μm , com o valor de D10 sendo 45,68 μm , D50 de 63,77 μm e D90 de 92,13 μm , e a PA3 tem tamanho médio de partícula de 42,01 μm , com o valor de D10 sendo 30,56 μm , D50 de 40,44 μm e D90 de 55,44 μm .

Pode-se inferir que a PA3 tem o menor tamanho médio de partículas entre as amostras e a menor faixa de distribuição de partículas, enquanto que a PA2, possui o maior tamanho médio e a maior faixa de distribuição. Embora a PA1 tenha o tamanho médio de partícula próximo do valor da PA3 (46 e 42 μm), ela apresenta faixa mais ampliada de distribuição de tamanho de partículas.

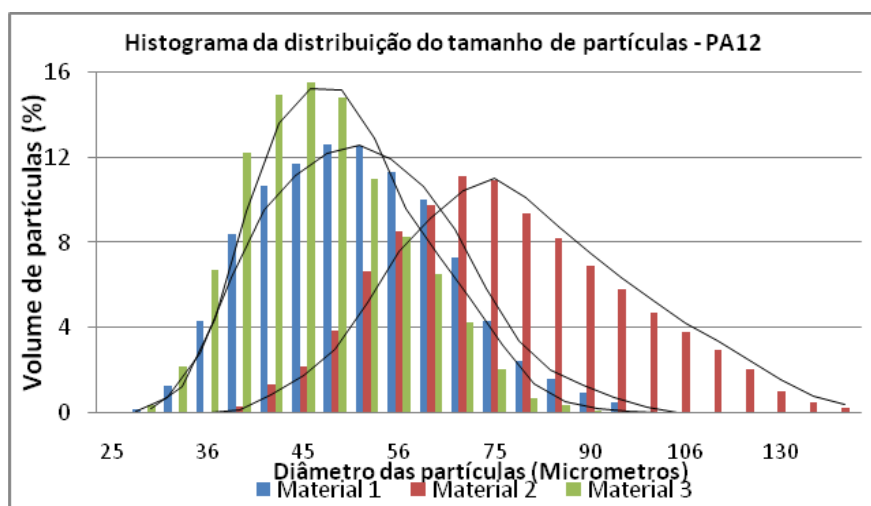


Figura 6. Gráfico do tamanho médio e distribuição dos tamanhos de partícula

6.2. Influência da densidade de energia nas propriedades mecânicas

Os resultados do módulo de elasticidade (fig. 7) mostraram que quando comparadas as três diferentes poliamidas investigadas, a poliamida PA2 apresentou valores superiores para módulo de elasticidade em todas as três combinações propostas. Para a PA1 e PA3, foi observado que os valores de módulo de elasticidade apresentados tem pequena diferença, e seus desvios padrão tornam suas médias equivalentes, exceto em P50V1300, no qual a PA3 superou o valor da PA1. Do ponto de vista de comparação de parâmetros diferentes para o mesmo material, a PA1 não apresentou diferenças significativas para as combinações P30V750 e P40V1000, e apresentou decréscimo do módulo na combinação P50V1300. A PA2 não apresentou diferenças significativas nos resultados de módulo de elasticidade para as três combinações testadas e a PA3 apresentou um acréscimo no módulo de elasticidade quando testada sob a combinação P50V1300.

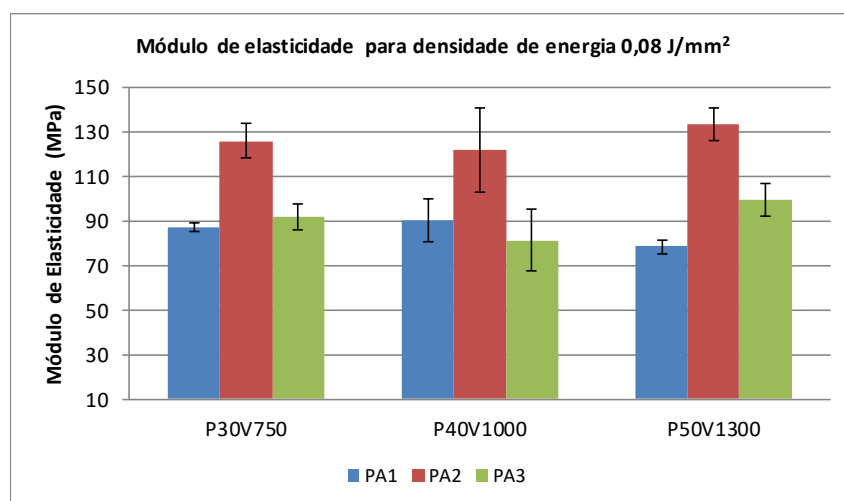


Figura 7. Resultados do módulo de elasticidade

Na análise de tensão máxima (fig. 8) e acompanhando os resultados do módulo de elasticidade, a PA2 apresentou valores superiores para as tensões máximas em todas as três combinações testadas. Para as PA1 e PA3, os resultados mostraram semelhança para as combinações P30V750 e P40V1000 e um acréscimo foi observado da PA3 sobre a PA1 na combinação P50V1300. Na PA2 foi observado um crescimento da tensão máxima ao passo que a potência e a velocidade foram aumentadas, o que ocorreu de forma inversa com a PA1 e para a PA3 não foi possível identificar mudanças significativas.

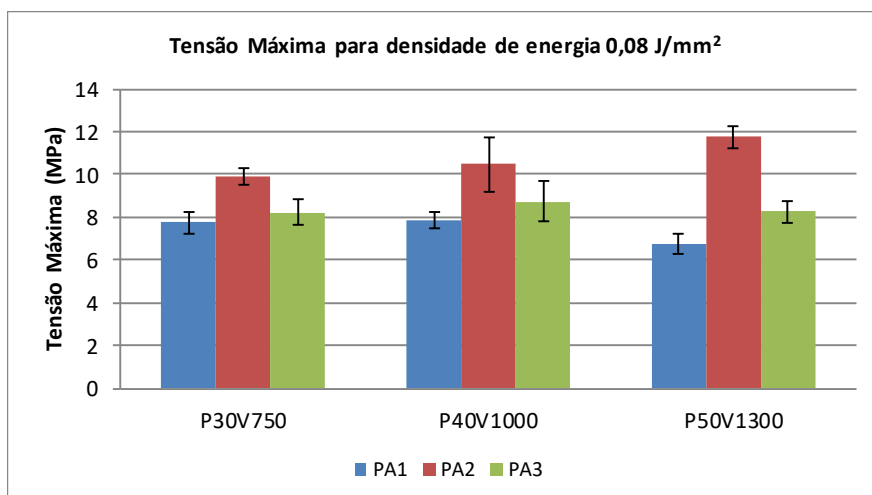


Figura 8. Resultados da tensão máxima

Na avaliação da deformação total (fig. 9), inversamente aos resultados do módulo de elasticidade e tensão máxima, a PA2 foi a que apresentou os menores valores de deformação total. Por outro lado, a PA1 e a PA3 apresentaram os maiores valores de deformação total sem evidenciar diferenças significativas entre seus resultados.

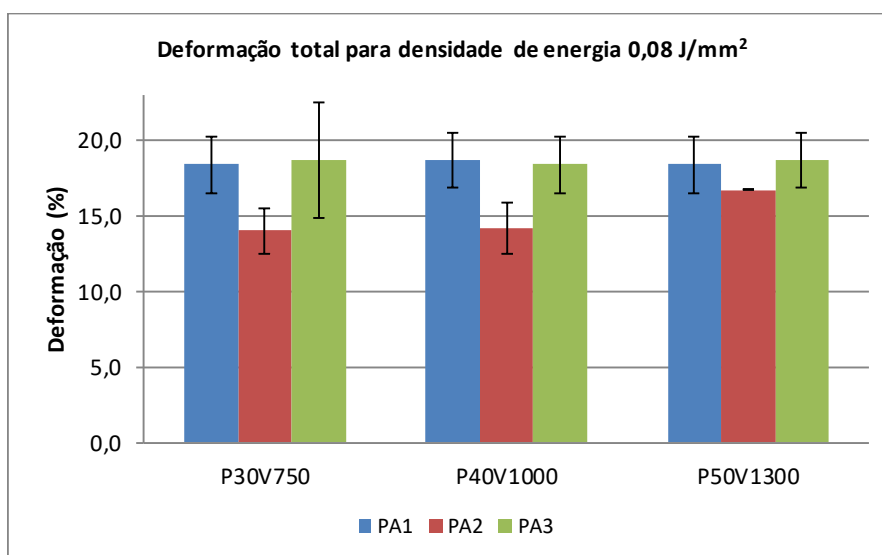


Figura 9. Resultados da deformação total

A PA2 foi a que apresentou os maiores valores de densidade aparente quando comparada as PA1 e PA3 (fig. 10), alcançando o valor máximo médio de $0,7 \text{ g/cm}^3$ na combinação P40V1000. A PA3 apresentou valores de densidade superiores a PA1 nas combinações P30V750 e P50V1300. Já na comparação de parâmetros diferentes para o mesmo material, a PA1 apresentou comportamento de densidade aparente crescente para P40V1000 e decresceu em P50V1300. Já a PA3 embora tenha apresentado valor superior em P30V750, seus desvios padrão não podem confirmar que este valor é significativo perante as outras combinações.

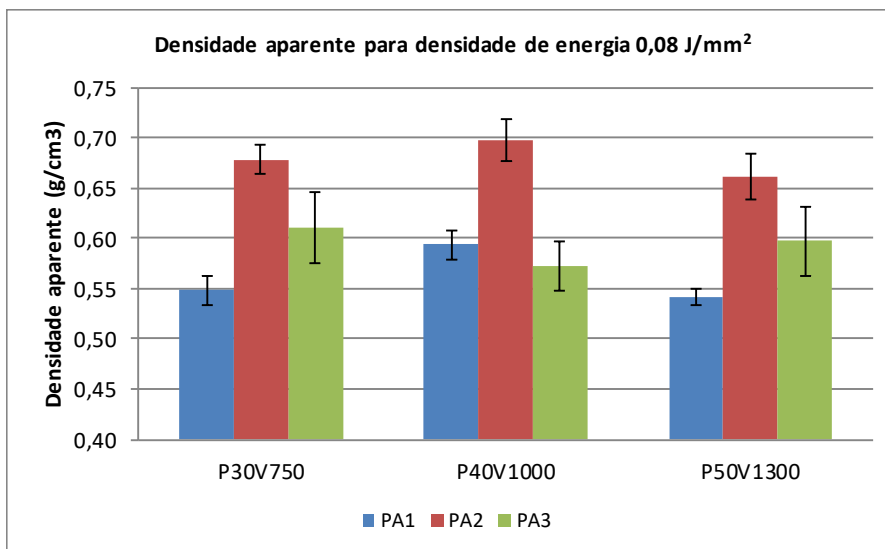


Figura 10. Resultados da densidade aparente

6.3. Análise microestrutural

A verificação de características morfológicas da região superficial das amostras foi realizada em virtude da possibilidade de comparação entre amostras fabricadas com parâmetros diferentes em termos de potência do laser, velocidade de varredura e material, mas que permeiam os mesmos valores de densidade de energia. Porosidade e grau de sinterização são avaliações relevantes na caracterização das amostras e determinação da contribuição de cada parâmetro em questão. A correlação das imagens e ensaios mecânicos pode justificar os comportamentos observados.

A partir dos resultados das imagens MEV foi verificado que para os três tipos de PA12 investigados, o grau de coalescência das partículas e respectiva densificação foi pequeno. Diferenças ocorreram com relação a PA2, que com os mesmos parâmetros de equipamento utilizados apresentou maior grau de coalescência de suas partículas, o que é justificado pelo fato de ter apresentado os maiores valores de módulo de elasticidade, tensão máxima e densidade aparente, e os menores valores de deformação total.

Outro resultado evidenciado pela análise microestrutural é que embora, todas as amostras tenham sido fabricadas sob as mesmas condições no que tange a densidade de energia, a mudança dos parâmetros velocidade de varredura e potência do laser, promoveu diferenças morfológicas nas superfícies das peças. Isto pode ser evidenciado pela imagem da amostra da PA1 quando fabricada sob os parâmetros P30V750, onde aparentemente não é possível identificar ou visualizar as linhas de fusão promovidas pela trajetória do feixe de laser. Diferente do que ocorre quando o mesmo material é fabricado por P40V1000 e P50V1300, evidenciando as linhas de fusão. Situações semelhantes ocorrem também para a PA2 e a PA3, porém em menor proporção.

Outro resultado importante no que diz respeito a PA2 é que quando submetida aos parâmetros P50V1300 ela apresentou maior grau de densificação em relação as outras combinações de parâmetros.

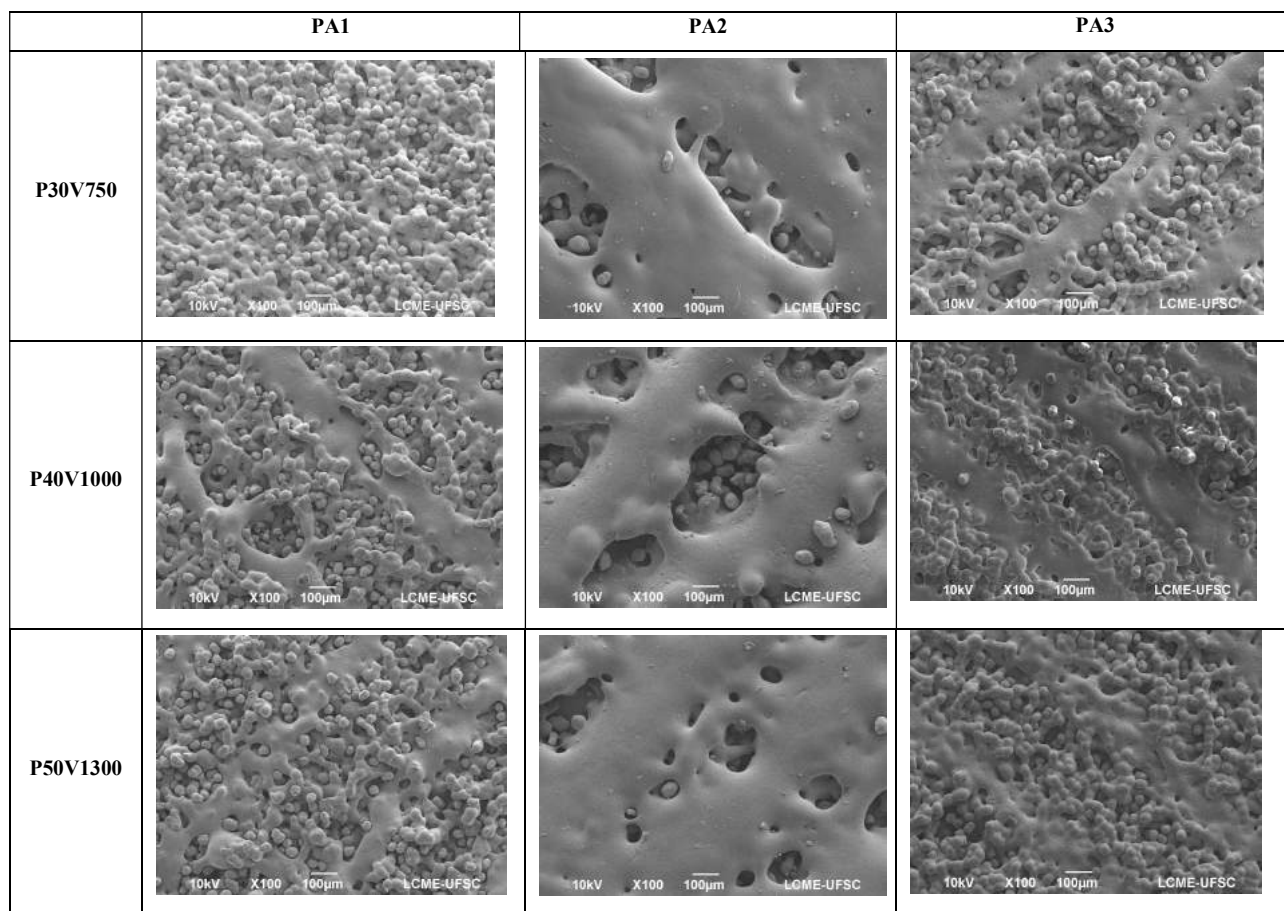


Figura 11. MEV da superfície superior dos corpos de prova fabricados com as respectivas PA12 e as combinações de parâmetros utilizadas

7. CONCLUSÕES

Este trabalho realizou o estudo da influência da densidade de energia sobre as propriedades de peças fabricadas em diferentes PA12 por sinterização seletiva a laser, mediante a alteração de alguns dos parâmetros de processo.

As diferentes propriedades intrínsecas e extrínsecas das diferentes PA12 apontadas por Amado et al. (2011), Schmid et al. (2014) e Verbelen et al. (2015), foram constatadas mediante a caracterização dos materiais. As propriedades intrínsecas como as propriedades térmicas e ópticas foram confirmadas. As temperaturas de cristalização (T_c) e temperaturas de fusão (T_f) das amostras mostraram diferenças no que diz respeito aos valores obtidos no ensaio de DSC de modo que as PA12 investigadas apresentaram valores de “janela de sinterização” com diferenças de até 10 °C. Contudo, não foi possível afirmar que as diferenças neste sentido afetaram significativamente o grau de sinterização das partículas.

Embora os testes tenham ocorrido em temperatura inferior a T_{cs} , portanto fora da janela de sinterização recomendada, trouxeram respostas para uma nova situação, evidenciando que o equipamento utilizado permitiu a fabricação de peças com bom manuseio em condições diversas do que aponta a literatura, apesar de resultarem em peças porosas e de baixa rigidez. Tal situação foi comprovada através da avaliação das propriedades mecânicas que resultaram inferiores aos valores apresentados usualmente na literatura sendo que o módulo de elasticidade atingiu valores da ordem de até 10%, a tensão máxima até 25%, e a deformação total e densidade aparente de até 75% dos valores nominais alcançados em peças densas. Estes valores reduzidos das propriedades foram confirmados pelas imagens obtidas em MEV, as quais mostraram baixo grau de coalescência das partículas e elevada porosidade.

Comparativamente entre os materiais investigados, a PA2 foi o material que apresentou os maiores valores em termos de módulo de elasticidade, tensão máxima, e densidade aparente, e, por outro lado os menores valores de deformação total, justificado por ter resultado em uma microestrutura mais densificada que a PA1 e a PA3. Diferentemente do que apontam algumas literaturas, os maiores valores de propriedades mecânicas não foram conferidos ao material que apresentou os menores tamanhos médios de partícula e menor distribuição, mas foram apresentados pelo material que apresentou a maior distribuição de partículas e maior tamanho médio, o que acarretou em melhor compactação e redução de espaços vazios entre as partículas.

O trabalho evidenciou que, apesar de ter sido utilizada uma mesma densidade de energia, dentro dos valores recomendados por Franco et al. (2008), não foi possível obter os mesmos resultados para PA12 de fornecedores diferentes, devido a diferenças de morfologia (forma, tamanho e distribuição de partículas) e eventualmente composição química (presença de aditivos) de cada PA. Não se pode afirmar que houve alterações nas propriedades mecânicas utilizando-se diferentes parâmetros em termos de potência de laser e velocidade de varredura. As propriedades foram significativamente alteradas somente quando alterado o tipo de PA12 empregada.

Num contexto geral, a cada novo material a ser empregado na manufatura aditiva por SLS, e a cada novo equipamento lançado no mercado ou academia, uma nova investigação é demandada. O embasamento de dados das literaturas e utilização das repetições apresentadas pode não ser sinônimo de sucesso. Testes continuados são necessários para qualificação da fabricação SLS considerando o conjunto de avaliações entre as propriedades do material empregado e as especificações do equipamento, assim como seus mecanismos de controle.

8. AGRADECIMENTOS

Agradecimentos a empresa Alkimat Tecnologia pelo interesse no conhecimento da pesquisa e por ceder o equipamento *LaserFunde* para a realização deste trabalho. Da mesma forma, ao laboratório NIMMA da Universidade Federal de Santa Catarina pelo oferecimento do espaço para o trabalho e à CAPES pela bolsa concedida.

9. REFERÊNCIAS

- AMADO A., SCHMID M., LEVY G., WEGENER K.: Advances in SLS powder characterization. In Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin, TX, 2011. 438–452 p.
- CAULFIELD B., MCHUGH, P.E., LOHFELD, S., Dependence of mechanical properties of polyamide components on build parameter in the SLS process. *Journal of Materials Processing Technology*. 2006.
- DAHOTRE, N.B. HARIMKAR, S.P. *Laser Fabrication and Machining of Materials*. Springer. [e-book] Springer Science + Business Media, LLC. New York. 2008.
- EOS - Electro optical systems. Acesso em: 01 de Novembro de 2016. <<http://www.eos.info>>
- FRANCO A., LANZETTA M., ROMOLI L.. Experimental analysis of selective laser sintering of polyamide powders: Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Nucleare e della Produzione, University of Pisa, Pisa, Italy 2010.
- GAO, W., ZHANG, Y., RAMANUJAN D., RAMANI K., CHEN Y., WILLIAMS C., CHARLIE C., WANG C, SHIN Y., ZHANG S., ZAVATTIERI P. The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering. *CAD Computer Aided Design*. v. 69, 2015. p 65-89.
- GIBSON, I., DONGPING, S. Material properties and fabrication parameters in selective laser sintering process. *Rapid Prototyping Journal*. Volume 3, Number 4. MCB University Press 1997.
- PEYRE, P. ROUCHAUSSE Y., DEFAUCHY, D., REGNIER G., Experimental and numerical analysis of the selective laser sintering (SLS) of PA12 and PEKK semi-crystalline polymers. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 225, 2015. p. 326–336.
- RIETZEL D.: Werkstoffverhalten und Prozessanalyse beim Laser-Sintern von Thermoplasten. Ph.D. Dissertation, Technischen Fakultät der Universität Erlangen-Nürnberg, Erlangen, Germany, 2015.
- SCHMID, M., AMADO, A., WEGENER, K., Materials perspective of polymers for additive manufacturing with selective laser sintering irpd – Institute for Rapid Product Development, CH-9014 St. Gallen, Switzerland, 2014
- STEEN, W. M. *Laser Material Processing*. Springer-Verlag, ISBN 3-540-19670-6, 1991.
- TIAN, X. GÜNSTER, J., MELCHER, J. LI, D. HEINRICH, J.G.. Process parameters analysis of direct laser sintering and post treatment of porcelain components using Taguchi's method. 2008. [e-journal]. *Journal of the European Ceramic Society Journal*. Volume 29, 2009.
- VERBELEN, L., DADBAKSH, S., VAN DEN EYNDE, M., KRUTH, J. P., GODERIS, B., VAN PUYVELDE, P. Characterization of polyamide powders for determination of laser sintering processability. *European Polymer Journal*, 75, 2015. P. 163–174.

10. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

ENERGY DENSITY INFLUENCE ON MECHANICAL PROPERTIES OF DIFFERENT PA12 PARTS MANUFACTURED BY SELECTIVE LASER SINTERING

Murilo Alexandre Fendrich, muriloaf@gmail.com¹
Carlos Henrique Ahrens, carlos.ahrens@ufsc.br¹

¹Federal University of Santa Catarina, R. Eng. Agrônomo Andrei Cristian Ferreira, s/n – Trindade, Florianópolis – SC, 88040-900.

Abstract: *Selective laser sintering (SLS) is considered one of the most versatile additive manufacturing technologies due its ability to process many types of materials. Among the polymeric materials, Polyamide 12 is the most commonly used. Research results published in the literature show that the final properties of the parts obtained by this technique depends on a composition of variables (parameters) set in the equipment, which influence the sintering process. Also, the geometric characteristics and properties of PA12 employed are also identified as conditions that can influence the sintering dynamics. However, the knowledge obtained so far about the manufacturing process with this material is based fundamentally in raw materials dedicated to manufacture in a specific commercial equipment. With the recent patent protection expiration for this type of technology, new equipment manufacturers as well as PA12 material suppliers emerged in the market, opening new opportunities to research and technology improvement. This study investigated the energy density influence of different powers applied by a CO₂ laser and different scanning speeds, in quality (mechanical properties and microstructure) of specimens manufactured in a national SLS equipment. PA12 from three different suppliers were employed. The results were evaluated in terms of: tensile modulus, maximum stress, total strain, apparent density and microstructure. The results showed that maintaining the applied energy density, increasing simultaneously the scan speed and laser power values, mechanical properties showed differences in terms of tensile modulus, maximum stress, total strain and apparent density. The morphological differences between the PA12 employed was shown to be the most influential factor for the mechanical properties in this study.*

Keywords: *additive manufacturing, selective laser sintering, polyamide 12, 3D printing*