

COMPARAÇÃO E ORDENAÇÃO DE PREFERÊNCIA ENTRE OS PROCESSOS DE MANUFATURA ADITIVA (MA) E USINAGEM CONVENCIONAL PARA A FABRICAÇÃO DE PEÇAS AERONÁUTICAS USANDO MÉTODO FUZZY TOPSIS

Júlia Fornaziero de Almeida

Departamento de Engenharia de Produção, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, Av. Trabalhador São-Carlense, 400 – Parque Arnold Schmidt, São Carlos, 13566-590, Brasil

julia.f.almeida@usp.br

Germán Alberto Barragán de Los Rios

Grupo de investigación en Ingeniería Aeroespacial, Universidad Pontificia Bolivariana, Cir 1 N 70-01, Medellín, 050031, Colombia.

german.barragan@upb.edu.co

Luiz Cesar Ribeiro Carpinetti

Reginaldo Teixeira Coelho

Departamento de Engenharia de Produção, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, Av. Trabalhador São-Carlense, 400 – Parque Arnold Schmidt, São Carlos, 13566-590, Brasil

carpinet@sc.usp.br; rtcoelho@sc.usp.br

Resumo. A produção de peças metálicas para a indústria aeronáutica exige a obtenção de estruturas com alta qualidade e propriedades mecânicas compatíveis com as aplicações. Atualmente a manufatura aditiva (MA) para metais vem sendo utilizada para a produção destas peças, e os processos Powder Bed Fusion (PBF) e Laser Directed Energy Deposition (DED) são os mais explorados. O objetivo deste trabalho foi utilizar o método de tomada de decisão Fuzzy TOPSIS comparando os processos PBF, DED e usinagem convencional para a fabricação de uma determinada peça aeronáutica, decidindo entre eles qual é mais adequado segundo especificações da aplicação. Os resultados mostraram que, a decisão ainda deve ser pela usinagem convencional, segundo os critérios de maior impacto: precisão dimensional, propriedades mecânicas e acabamento superficial, exigidos nas aplicações aeronáuticas. Os processos de MA, PBF e DED, sem um pós-processamento, ainda não são capazes de satisfazer as exigências desse mercado, sem a utilização de usinagem como pós-processamento. Estes dados mostram que melhorias nesses processos de MA, ou o emprego de Manufatura Híbrida (MH), incluindo-se os processos de usinagem, deve ser o caminho para que a MA seja mais amplamente adotada na indústria aeronáutica.

Palavras chave: Manufatura Aditiva. PBF. DED. Fuzzy-TOPSIS. Indústria Aeronáutica.

1. INTRODUÇÃO

A manufatura aditiva (MA) é atualmente uma das tecnologias de fabricação mais estudadas e exploradas dentro das empresas para diversas aplicações (Milewski, 2017), sendo os processos Powder Bed Fusion (PBF) e Directed Energy Deposition (DED) os mais comumente visados para peças metálicas (Bourell, *et al.*, 2017; Calignano, *et al.*, 2019). A indústria aeronáutica vem investindo nesta tecnologia, e é um dos setores que mais exploram a MA. Nesta área são diversos os desafios, exigindo peças de alta qualidade com funções de alto risco de falha (Milewski, 2017).

As questões que guiam esse trabalho são: No estágio de desenvolvimento em que a MA se encontra ela é a mais indicada para a produção de peças aeronáuticas sem pós-processamento? E quais critérios são mais importantes para estas aplicações?

Para avaliar os critérios e selecionar o melhor processo de fabricação, métodos de tomada de decisão por múltiplos critérios (MCDM – Multi-Criteria Decision Making) podem ser utilizados, com as avaliações sendo realizadas por especialistas da área. A técnica de preferência de ordem por similaridade à solução ideal (TOPSIS – Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) é um método MCDM que permite a ordenação das alternativas mais próximas da solução ideal e distantes da solução negativa (Kahraman, 2008). Este método é utilizado junto com os conjuntos fuzzy para ajustar as avaliações, por meio de variáveis linguísticas, permitindo a análise de informações imprecisas (Kahraman, 2008), união que resulta no método conhecido como Fuzzy TOPSIS.

Este artigo apresenta um estudo em que se utiliza o método Fuzzy TOPSIS para ranquear os processos PBF, DED e usinagem convencional, a fim de avaliar o processo que produz a peça mais adequada para aplicações na indústria aeronáutica, sem pós-processamento, isto é, sem o uso de manufatura híbrida, considerando os seguintes critérios: Custo do processo; Acabamento superficial; Precisão dimensional; Propriedades mecânicas; Volume de produção; complexidade; e Tempo de Construção. Trata-se de uma pesquisa axiomática prescritiva, usando modelo computacional, que tem como intuito comparar os processos e avaliar quais critérios são mais críticos. No processo

decisório, destaca-se também o que deve ser desenvolvido na MA para que esta possa atender no futuro às exigências dessa aplicação específica.

2. MANUFATURA ADITIVA (MA)

A Manufatura Aditiva (MA) é definida pela ASTM F 2792 - 10 (2010) como “processo de união de materiais para criar objetos a partir dos dados do modelo 3D, geralmente camada sobre camada, em oposição às metodologias de fabricação subtrativas”. Outros termos como *Desktop Manufacturing*; *Rapid Tooling*; *3D Printing* (Impressão 3D) e *Freeform Fabrication* também são utilizados para se referir à tecnologia (Jiménez, *et al.*, 2019).

A norma ASTM (2012) com o subcomitê F42, responsáveis pelas tecnologias de MA, agrupam os processos de MA em sete categorias, sendo elas: *Binder jetting*; *Directed energy deposition* (DED); *Material extrusion*; *Material jetting*; *Powder-bed fusion* (PBF); *Sheet lamination*; e *Vat photopolymerization*. Dentre as diversas tecnologias existentes quatro tem a capacidade de produzir peças metálicas: PBF; DED; *binder jetting* e *sheet lamination* (Strong, *et al.*, 2018), sendo os processos PBF e DED os mais amplamente empregados (Bourell, *et al.*, 2017; Calignano, *et al.*, 2019).

Aplicações em metais são exploradas em diversos setores, principalmente nas indústrias aeronáutica, aeroespacial, automotiva e médica (Gibson, *et al.*, 2015; Milewski, 2017).

2.1. A MA para Metais na Indústria Aeronáutica e Aeroespacial

Aplicações da MA na indústria aeroespacial vêm ganhando destaque nos últimos anos. Diversas empresas estão investindo na tecnologia: fabricantes de aviões comerciais, helicópteros militares, foguetes e satélites (Weber, 2016).

Dentre os principais benefícios da utilização da MA em peças aeronáutica está a facilidade de fabricar geometrias complexas, permitindo a produção com materiais de alto desempenho com um peso inferior ao obtido por manufatura convencional (Gibson, *et al.*, 2015). Porém, ainda existem dificuldades para garantir a qualidade das peças produzidas (Amini e Chang, 2018; Galantucci, *et al.*, 2019) e na literatura são identificados diversos problemas relacionados com o acabamento superficial (Baumers, *et al.*, 2016; Flynn, *et al.*, 2016; Jiménez, *et al.*, 2019; Portolés, *et al.*, 2016; Schmidt, *et al.*, 2017; Shapiro, *et al.*, 2016), precisão dimensional (Atzeni e Salmi, 2012; Baumers, *et al.*, 2016; Duda e Raghavan, 2018; Flynn, *et al.*, 2016; Kretschmar, *et al.*, 2018; Malekipour e El-Mounayri, 2018; Portolés, *et al.*, 2016), e propriedades mecânicas (Flynn, *et al.*, 2016; Zadpoor, 2018). Tudo isto além de considerar o fato de que a maioria dos processos MA para metais pode requerer algum tipo de pós-processamento uma vez que a rugosidade pode não atender determinadas aplicações (Duda e Raghavan, 2018; Kretschmar, *et al.*, 2018; Leal, *et al.*, 2017; Salmi, *et al.*, 2018; Schmidt, *et al.*, 2017).

A MA está sendo constantemente aprimorada, e à medida que melhorias na qualidade da peça final, aumento da velocidade de processamento, entre outras, forem possíveis, diversas outras aplicações no setor poderão ser exploradas (Weber, 2016).

3. FUZZY TOPSIS

A técnica de preferência de ordem por similaridade à solução ideal (TOPSIS - *Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*) é um método de tomada de decisão por múltiplos critérios (MCDM - *Multi-Criteria Decision Making*) que seleciona a alternativa mais próxima possível da solução ideal, melhores valores de desempenho, e o mais longe possível da solução negativa, piores valores de desempenho (Kahraman, 2008). Para ajustar as avaliações, os conjuntos fuzzy foram incorporados aos modelos MADM, permitindo que a modelagem inclua as incertezas, captando a subjetividade humana (Chen e Hwang, 1992). Os conjuntos *fuzzy* são termos linguísticos utilizados para critérios que não podem ser definidos de forma exata, pois não apresentam limites bem definidos (Kahraman, 2008), assim foram ajustados no modelo obtendo o método fuzzy-TOPSIS (Kahraman, 2008).

Os Números Fuzzy - NF possibilitam o julgamento de um tomador de decisão de maneira quantitativa por meio de variáveis linguísticas. Os números fuzzy podem ser triangulares, trapezoidais e gaussianos, sendo os triangulares e trapezoidais os mais utilizados em processo decisório (Nădăban, *et al.*, 2016). No estudo será utilizado o NF triangular, que é definido pela função de associação apresentada na Eq. (1).

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0 & \text{para } x < l, (x-l)/(m-l) & \text{para } l \leq x \leq m, (u-x)/(x-m) & \text{para } m \leq x \leq u \\ 0 & \text{para } x > u \end{cases} \quad (1)$$

Representado por $\tilde{x} = (l, m, u)$ (Lima Junior, *et al.*, 2014).

No método Fuzzy TOPSIS as variáveis linguísticas são utilizadas pelos decisores D_r ($r = 1, \dots, k$), para determinar os pesos dos critérios C_j ($j = 1, \dots, m$) e para classificar as alternativas A_i ($i = 1, \dots, n$) em relação aos critérios j (Lima Junior, *et al.*, 2014). As etapas do método são apresentadas a seguir com base nos trabalhos de Chen (2000) e de Lima Junior, *et al.* (2014).

Etapla 1: Agregação dos pesos e classificação das alternativas dadas por k decisores, as equações são representadas em Eq. (2) e Eq. (3).

$$\tilde{w}_j = \frac{1}{k} [\tilde{w}_j^1 + \tilde{w}_j^2 + \dots + \tilde{w}_j^k] \quad (2)$$

$$\tilde{x}_{ij} = \frac{1}{k} [\tilde{x}_{ij}^1 + \tilde{x}_{ij}^r + \dots + \tilde{x}_{ij}^k] \quad (3)$$

Etapa 2: Criação da matriz de decisão fuzzy para as alternativas (\tilde{D}) e para os critérios (\tilde{W}), como representado na Eq. (4) e Eq. (5).

$$\tilde{D} = \begin{matrix} & \begin{matrix} C_1 & C_2 & C_3 & C_4 \end{matrix} \\ \begin{matrix} A_1 \\ \vdots \\ A_n \end{matrix} & \begin{bmatrix} \tilde{x}_{11} & \tilde{x}_{12} & \tilde{x}_{1j} & \tilde{x}_{1m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \tilde{x}_{n1} & \tilde{x}_{n2} & \tilde{x}_{nj} & \tilde{x}_{nm} \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (4)$$

$$\tilde{W} = [\tilde{w}_1 + \tilde{w}_2 + \dots + \tilde{w}_m] \quad (5)$$

Etapa 3: Normalização da matriz de decisão fuzzy (\tilde{D}). Para evitar a formula usada no TOPSIS é usada a transformação da escala linear para ajustar as escalas dos critérios (Chen, 2000). A matriz normalizada (\tilde{R}) é dada pelas equações Eq. (6), Eq. (7) e Eq. (8).

$$\tilde{R} = [\tilde{r}_{ij}]_{m \times n} \quad (6)$$

$$\tilde{r}_{ij} = \left(\frac{l_{ij}}{u_j^+}, \frac{m_{ij}}{u_j^+}, \frac{u_{ij}}{u_j^+} \right), u_j^+ = \max_i u_{ij} \text{ (Critérios de benefício)} \quad (7)$$

$$\tilde{r}_{ij} = \left(\frac{l_j^-}{u_{ij}^-}, \frac{l_j^-}{m_{ij}^-}, \frac{l_j^-}{l_{ij}^-} \right), l_j^- = \max_i l_{ij} \text{ (Critérios de custo)} \quad (8)$$

Etapa 4: Cálculo da matriz de decisão fuzzy normalizada e ponderada (\tilde{V}) multiplicando os pesos pelos elementos da matriz normalizada, de acordo com a Eq. (9).

$$\tilde{V} = [\tilde{v}_{ij}]_{m \times n} \quad (9)$$

Sendo que \tilde{v}_{ij} é dado pela Eq. (10).

$$\tilde{v}_{ij} = \tilde{x}_{ij} \times \tilde{w}_{ij} \quad (10)$$

Etapa 5: Definição da solução ideal positiva fuzzy (FPIS, A^+ - Fuzzy Positive Ideal Solution) e a solução ideal negativa (FNIS, A^- - Fuzzy Negative Ideal Solution). Representadas na Eq. (11) e Eq. (12).

$$A^+ = \{\tilde{v}_1^+, \tilde{v}_j^+, \dots, \tilde{v}_m^+\} \quad (11)$$

$$A^- = \{\tilde{v}_1^-, \tilde{v}_j^-, \dots, \tilde{v}_m^-\} \quad (12)$$

$$\text{Sendo } \tilde{v}_1^+ = \max_i \{u_{vij}\} \text{ e } \tilde{v}_1^- = \min_i \{l_{vij}\}.$$

Etapa 6: Cálculo das distâncias d_i^+ e d_i^- de cada alternativa v_j^+ e v_j^- de acordo com a Eq. (13) e Eq. (14):

$$d_i^+ = \sum_{j=1}^n d(\tilde{v}_{ij}, \tilde{v}_j^+), i=1, 2, \dots, m. \quad (13)$$

$$d_i^- = \sum_{j=1}^n d(\tilde{v}_{ij}, \tilde{v}_j^-), i = 1, 2, \dots, m.. \quad (14)$$

Sendo d a distância entre dois números fuzzy, calculado para números triangulares como na Eq. (15):

$$d(\tilde{x}, \tilde{z}) = \sqrt{\frac{1}{3} \left[(l_x - l_z)^2 + (m_x - m_z)^2 + (u_x - u_z)^2 \right]} \quad (15)$$

Etapa 7: Cálculo do coeficiente de aproximação CC_i pela Eq. (16):

$$CC_i = \frac{d_i^-}{d_i^+ + d_i^-} \quad (16)$$

Etapa 8: Definição do ranking das alternativas de acordo com o coeficiente de aproximação, em ordem decrescente. A melhor alternativa está mais próxima do FPIS e a mais distante do FNIS.

Com este método é possível ordenar e classificar as alternativas da melhor à pior de acordo com os critérios escolhidos. O estudo de Lima Junior, *et al.*, (2014) compara os métodos Fuzzy AHP e Fuzzy TOPSIS, evidenciando que o método Fuzzy TOPSIS é preferível por não impor restrições ao número de alternativas ou critérios utilizados, e não há inversão de ranking, quando há uma modificação nos critérios, como ocorre no Fuzzy AHP. O Fuzzy TOPSIS tem uma melhor interação com os tomadores de decisão na coleta de dados, fornecendo maior agilidade no processo de decisão. Por esses motivos o método Fuzzy TOPSIS foi escolhido para este estudo.

4. APLICAÇÃO DO MÉTODO FUZZY TOPSIS EM PEÇA AERONÁUTICA

Para a fabricação de uma peça aeronáutica, vários fatores podem ser determinantes na escolha do processo produtivo. Para comparar e ordenar a preferência dos processos PBF, DED e usinagem convencional pelo método fuzzy

TOPSIS, uma peça já fabricada em MA para aplicação na indústria aeronáutica representada na Fig. 1 foi escolhida e avaliada por decisores, especialistas em MA e processos de fabricação nas áreas de engenharia aeronáutica, mecânica e de produção. Eles foram escolhidos pela experiência e para integrar diferentes visões no processo de tomada de decisão.

A peça estudada, suporte de cabine para o Airbus A350 XWB, foi originalmente desenvolvida pela Concept LaserTM, por um processo PBF (LaserCUSINGTM). Trata-se de um componente fabricado em liga de titânio com um *design* 30% mais leve que os convencionais desenvolvidos usando processos de fundição ou fresamento (Liu, *et al.*, 2017; Masuch, 2014; Wimpenny, *et al.*, 2017). Para a avaliação, foi considerada a fabricação da peça já otimizada, inclusive para a produção no processo por usinagem convencional.



Figura 1. Suporte de cabine para o Airbus A350 XWB feito em liga de Ti, fabricado com a tecnologia MA – PBF. LaserCUSINGTM (Masuch, 2014).

A avaliação com a tomada de decisão pode obter um ranking dos processos, de acordo com as avaliações dos decisores, para determinar qual o processo, PBF (A1); DED (A2) ou usinagem convencional (A3), obtém uma peça final mais adequada para a aplicação sem passar por pós-processamento. Os critérios avaliados foram: Custo do processo (C1); Acabamento superficial (C2); Precisão dimensional (C3); Propriedades mecânicas (C4); Volume de produção (C5); Complexidade (C6); e Tempo de fabricação (C7).

Para a obtenção dos dados foi criado um questionário via Google FormsTM, com explicações da peça a ser avaliada e dos critérios que deveriam ser analisados pelos decisores.

As seguintes informações foram fornecidas sobre a peça: As cargas que atuam na peça são estáticas no furo circular maior e na conexão com a parede externa do compartimento, por meio da rigidez de conexão definida por dez furos, mostrados na Fig. 2a. A carga dinâmica é de 5915 N em ambas as direções (Kranz, 2017). Um modelo CAD simplificado, contendo algumas dimensões da peça, é apresentado na Fig. 2b.

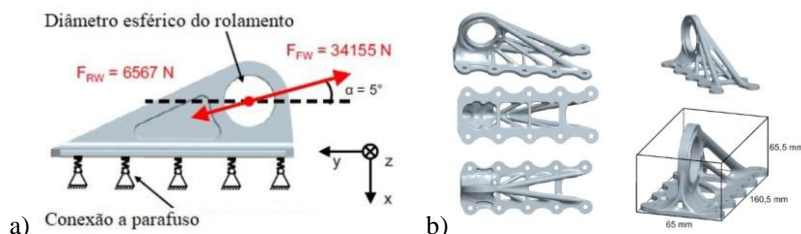


Figura 2. a) Situação de Estresse Suporte de Cabine. b) Modelo CAD simplificado do Suporte de Cabine com algumas dimensões da peça (Kranz, 2017).

Explicações sobre os critérios para a avaliação das alternativas e seu peso, foram fornecidas para evitar dúvidas no processo de tomada de decisão. Os critérios foram apresentados da seguinte forma: Custo do processo: envolve todos os custos de produção da peça, desde o custo da máquina, custo do material, custo da mão de obra, etc; Acabamento Superficial: está relacionado à qualidade da superfície obtida após o processo de fabricação da peça, sem passar por pós-processamento; Precisão Dimensional: é a variação das medição da peça fabricada em relação às dimensões especificadas; Propriedades Mecânicas: estão relacionadas ao comportamento da peça em relação às forças exercidas sobre esta; Volume de Produção: está relacionado à capacidade de produção do processo selecionado; Complexidade: indica o nível de dificuldade de produção da peça pelo processo; e Tempo de Fabricação: tempo necessário para a fabricação da peça.

A Tab. 1 apresenta os termos linguísticos utilizados para as avaliações dos pesos dos critérios e classificação das alternativas, baseado nos trabalhos de Chen (2000) e de Lima Junior, *et al.*, (2014), utilizando números fuzzy triangulares. Ou seja, se avaliado o peso do critério como Importante (I) este eram substituídos nos cálculos pelo número triangular (0,50; 0,75; 1,00) para assim evitar a imprecisão na análise dos decisores. Desta forma o julgamento das alternativas e dos pesos dos critérios feita pelos decisores como mostrado na Tab. 2 foram convertidos em números triangulares para a realização dos cálculos.

Os cálculos do método Fuzzy TOPSIS foram realizados em uma planilha do Excel, na qual os dados foram inseridos. A Tab. 3 agrega os julgamentos dos decisores em números fuzzy de acordo com as Eq. (2) e (3), que em seguida foram normalizados (Tab. 4, Eq. (6), (7) e (8)). A Tab. 5 mostra os dados normalizados e ponderados (Eq. (10)). As soluções ideais positivas e negativas foram calculadas de acordo com as Eq. (11) e (12), Tab. 6. Nas Tab. 7 e Tab. 8 são apresentados os resultados das distâncias d_i^+ e d_i^- (Eq. (15), (13) e (14)). A Tab. 9 apresenta o coeficiente de aproximação CC_i (Eq. (16)), classificando o processo Usinagem convencional como primeiro por apresentar maior CC_i , ou seja, que obtém uma peça mais adequada sem pós-processamento, seguido dos processos PBF e DED.

Tabela 1. Escala linguística dos pesos dos critérios e para classificação das alternativas

Pesos dos critérios	Termo Linguístico	Número Triangular Fuzzy		
		l	m	u
Nada importante (NI)	Muito Ruim (MR)	0,00	0,00	0,25
Pouco Importante (PI)	Ruim (R)	0,00	0,25	0,50
Medianamente importante (M)	Médio (M)	0,25	0,50	0,75
Importante (I)	Bom (B)	0,50	0,75	1,00
Muito importante (MI)	Muito bom (MB)	0,75	1,00	1,00

Tabela 2: Avaliação dos Decisores

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
D1							
A1	M	B	B	M	MR	MB	R
A2	B	R	R	M	M	B	M
A3	MR	MB	MB	B	MR	MR	MR
Peso	PI	I	MI	MI	NI	NI	PI
D2							
A1	R	R	B	MB	M	MB	M
A2	R	MR	M	MB	R	B	B
A3	M	MB	MB	MB	R	M	B
Peso	M	MI	MI	MI	M	I	I
D3							
A1	M	M	B	M	M	M	M
A2	MR	MR	MR	MR	MR	R	R
A3	R	MB	MB	MB	M	M	M
Peso	MI	MI	MI	MI	I	MI	I

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados dos cálculos pelo método Fuzzy TOPSIS mostram como os decisores determinaram os pesos e classificaram as alternativas idealizando a produção da peça Suporte de Cabine para o Airbus A350 XWB, fabricado em liga de Ti. O ranking obtido mostrou que os processos de MA, PBF e DED, ainda não seriam capazes de obter uma peça final, sem pós-processamento, tão adequada quanto o processo de usinagem convencional, como destacado por Amini e Chang, (2018) e Galantucci, *et al.* (2019) os processos de MA ainda tem dificuldade de garantir a qualidade das peças.

De acordo com a classificação dos pesos, os critérios precisão dimensional e propriedades mecânicas foram avaliados pelos decisores como muito importante, o que é característico de peças destinadas a esse setor. Como evidenciado na literatura, diversos autores (Atzeni e Salmi, 2012; Baumer, *et al.*, 2016; Duda e Raghavan, 2018; Flynn, *et al.*, 2016; Kretschmar, *et al.*, 2018; Malekipour e El-Mounayri, 2018; Portolés, *et al.*, 2016) destacam que a precisão dimensional em processos de MA ainda não são adequados, Flynn, *et al.* (2016) e Zadpoor (2018) também ressaltam que as propriedades mecânicas ainda não atingem as exigências de diversas aplicações. Dentre as diversas barreiras encontradas pela MA, na sua implementação (Almeida, 2021), estes dois critérios representam uma delas e, atualmente as peças obtidas por PBF e DED necessitam de pós-processamento para atingir as especificações do produto, principalmente em aplicações aeronáuticas. Sendo assim, a usinagem convencional se destacou em ambos os critérios de maior impacto, seguida do processo PBF. O acabamento superficial também é outra barreira de qualidade a ser vencida em peças de MA, e por isso o cenário foi semelhante, sendo o peso deste critério classificado como muito importante após a agregação dos julgamentos. Tal resultado pode ser usado para explicar a limitação do uso de MA em aeronáutica, uma vez que os responsáveis por decisões técnicas semelhantes a essa ainda hesitam em optar pelos processos de MA.

Para o critério custo do processo, avaliado com peso equivalente ao medianamente importante após a agregação dos julgamentos, o PBF obteve a melhor classificação. Nesse sentido, pode-se explicar por que a peça selecionada foi fabricada pelo processo PBF e não pelo DED, embora ambas tecnologias possam obter a peça selecionada. O critério volume de produção foi aquele com menor variação entre os 3 processos avaliados, uma vez que para uma máquina de usinagem produzir uma peça mais complexa a capacidade de produção é, certamente, reduzida. Assim é evidenciado que máquinas de usinagem têm apresentado maiores dificuldades para produzir peças aeronáuticas complexas, e no critério complexidade foi o processo menos indicado, sendo PBF o primeiro, seguido do processo DED. Tanto o critério volume de produção quanto a complexidade foram determinados em média pelos decisores com pesos medianamente importantes. E no critério tempo de construção, classificado com um peso medianamente importante, foi o critério que o processo DED se destacou. Na literatura consultada no presente trabalho, o processo DED é apontado como aquele com maior volume depositado por tempo, o que pode explicar a decisão quando se trata de tempo de fabricação.

Com a análise das escolhas e classificações de cada critério, é possível notar que a usinagem convencional se sobressaiu nos critérios com maior impacto na aplicação (precisão dimensional, propriedades mecânicas e acabamento superficial) de acordo com a análise dos decisores, se classificando como primeiro no ranking final. Uma possível solução é a utilização de manufatura híbrida (MA com usinagem), na qual se realiza a adição de material e o pós-processamento por usinagem em seguida, assim é possível que peças produzidas por processos PBF e DED atinjam as propriedades e características desejadas para aplicações aeronáuticas.

Tabela 3: Números fuzzy da agregação de julgamentos

	C1		C2		C3		C4		C5		C6		C7	
	l	u	l	u	l	u	l	u	l	u	l	u	l	u
A1	0,167	0,417	0,667	0,250	0,500	0,750	0,500	0,450	0,667	0,833	0,167	0,333	0,583	0,917
A2	0,167	0,333	0,583	0,000	0,083	0,250	0,333	0,500	0,667	0,083	0,250	0,500	0,333	0,833
A3	0,083	0,250	0,500	0,750	1,000	1,000	0,667	0,917	1,000	0,083	0,250	0,500	0,167	0,333
W	0,333	0,583	0,750	0,667	0,917	1,000	0,750	1,000	1,000	0,417	0,583	0,750	0,333	0,583

Tabela 4: Matriz Normalizada

	C1		C2		C3		C4		C5		C6		C7	
	l	u	l	u	l	u	l	u	l	u	l	u	l	u
A1	0,250	0,625	1,000	0,250	0,500	0,750	0,500	0,417	0,667	0,833	0,286	0,571	1,000	0,222
A2	0,250	0,500	0,875	0,000	0,083	0,250	0,333	0,500	0,667	0,143	0,429	0,857	0,364	0,909
A3	0,125	0,375	0,750	0,750	1,000	1,000	0,667	0,917	1,000	0,143	0,429	0,857	0,182	0,364
W	0,333	0,583	0,750	0,667	0,917	1,000	0,750	1,000	1,000	0,417	0,583	0,750	0,333	0,583

Tabela 5: Matriz Normalizada e Ponderada

	C1		C2		C3		C4		C5		C6		C7	
	l	u	l	u	l	u	l	u	l	u	l	u	l	u
A1	0,083	0,365	0,750	0,167	0,375	0,750	0,313	0,667	0,833	0,119	0,333	0,750	0,265	0,530
A2	0,083	0,292	0,656	0,000	0,063	0,250	0,250	0,500	0,667	0,060	0,250	0,643	0,152	0,371
A3	0,042	0,219	0,563	0,500	0,563	1,000	0,500	0,917	1,000	0,060	0,250	0,643	0,076	0,212

Tabela 6: Solução ideal positiva e negativa

	C1		C2		C3		C4		C5		C6		C7	
	l	u	l	u	l	u	l	u	l	u	l	u	l	u
A ⁺	0,750	0,750	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,750	0,750	0,750	0,750	0,833	0,833
A ⁻	0,042	0,042	0,000	0,000	0,063	0,063	0,250	0,250	0,060	0,060	0,076	0,076	0,074	0,074

Tabela 7: Distância A⁺ para cada alternativa em relação a cada critério.

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	d ⁺
A1	0,445	0,592	0,389	0,451	0,437	0,307	0,531	3,151
A2	0,470	0,875	0,751	0,555	0,496	0,411	0,490	4,048
A3	0,523	0,293	0,253	0,293	0,496	0,522	0,513	2,892

Tabela 8: Distância A^- para cada alternativa em relação a cada critério.

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	d_i^-
A1	0,450	0,517	0,695	0,415	0,430	0,482	0,411	3,400
A2	0,384	0,197	0,275	0,281	0,354	0,392	0,475	2,358
A3	0,318	0,835	0,818	0,597	0,354	0,245	0,412	3,578

Tabela 9: Coeficiente de aproximação e Classificação dos processos

Processo	Cci	Ordem
PBF	0,519	2º
DED	0,368	3º
Usinagem Convencional	0,553	1º

6. CONCLUSÃO

A MA tem se destacado como processo inovador dentro das indústrias para a produção de peças metálicas, porém, apresenta algumas características que precisam ser aprimoradas para ultrapassar os processos de usinagem convencional em determinadas aplicações, como em aeronáutica. Com a realização do estudo pode-se responder as questões apresentadas anteriormente, ou seja, “No estágio de desenvolvimento em que a MA se encontra ela é a mais indicada para a produção de peças aeronáuticas sem pós-processamento? E quais critérios são mais importantes para estas aplicações?” Estas questões podem ser respondidas da seguinte forma: No estágio de desenvolvimento atual a MA ainda não é a mais indicada para a produção de peças aeronáuticas sem pós-processamento, o que classificou a usinagem convencional como processo mais indicado para a aplicação, seguido dos processos PBF e DED. E os critérios mais importantes identificados no estudo foram: precisão dimensional, propriedades mecânicas e acabamento superficial, todos muito importantes para aplicações no mercado aeronáutico.

A utilização do método Fuzzy TOPSIS para tomar essas decisões mostrou que os critérios considerados mais importantes são os identificados como mais críticos na MA. Sendo assim é notável a necessidade de melhorias nos processos de MA nos quesitos de precisão dimensional, propriedades mecânicas e acabamento superficial para que estes sejam tão eficientes quanto os processos de usinagem convencional e exijam menos pós-processamento. Aplicações na indústria aeronáutica apresentam altos riscos e a peça deve atender todas as qualidades exigidas e as certificações para sua aplicação.

Variações podem ocorrer com o aprimoramento das máquinas e processos de MA e desenvolvimento de processos híbridos, MA e usinagem, na mesma plataforma. Máquinas com capacidade de deposição e usinagem podem ser o caminho mais adequado a seguir no futuro próximo. Com certeza será interessante repetir a presente avaliação à medida que a tecnologia evoluir.

7. AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. Agradecem os autores à FAPESP, processo 2106-11309-0, assim como aos profissionais especialistas consultados como Decisores para a realização dessa pesquisa.

8. REFERÊNCIAS

- Almeida, J. F. de. Adoção de Manufatura Aditiva (MA) para Metais em Empresas: identificação de barreiras e proposta de roteiro para implementação. Universidade de São Paulo, 2021.
- Amini, M. e Chang, S. I. MLCPM: A process monitoring framework for 3D metal printing in industrial scale. *Computers & Industrial Engineering*, v. 124, p. 322–330, 1 out. 2018.
- American Society for Testing and Materials. Standard terminology for additive manufacturing technologies, 2012.
- American Society for Testing and Materials. ASTM F2792 - 10: standard terminology for additive manufacturing technologies, 2010.
- Atzeni, E. e Salmi, A. Economics of additive manufacturing for end-usable metal parts. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 62, n. 9–12, p. 1147–1155, 8 out. 2012.
- Baumers, M. et al. The cost of additive manufacturing: machine productivity, economies of scale and technology-push. *Technological Forecasting and Social Change*, v. 102, p. 193–201, 1 jan. 2016.
- Bourell, D. et al. Materials for additive manufacturing. *CIRP Annals*, v. 66, n. 2, p. 659–681, 2017.
- CALIGNANO, F. et al. A Metal Powder Bed Fusion Process in Industry: Qualification Considerations. *Machines*, v. 7, n. 4, p. 72, 13 nov. 2019.
- Chen, C.-T. Extensions of the TOPSIS for group decision-making under fuzzy environment. *Fuzzy Sets and Systems*, v. 114, n. 1, p. 1–9, ago. 2000.
- Chen, S.-J.; HWANG, C.-L. *Fuzzy Multiple Attribute Decision Making Methods*. Springer-Verlag, 1992.
- Duda, T. e Raghavan, L. V. 3D metal printing technology: the need to re-invent design practice. *AI & SOCIETY*, v. 33, n. 2, p. 241–252, 6 maio 2018.
- Flynn, J. M. et al. Hybrid additive and subtractive machine tools – Research and industrial developments. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 101, p. 79–101, 1 fev. 2016.

- Galantucci, L. M. et al. Additive Manufacturing: New Trends in the 4th Industrial Revolution. In: Lecture Notes in Mechanical Engineering. Pleiades Publishing, 2019. p. 153–169.
- Gibson, I. et al. Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing, second edition. Springer New York, 2015.
- Jiménez, M. et al. Additive Manufacturing Technologies: An Overview about 3D Printing Methods and Future Prospects. Complexity, v. 2019, p. 1–30, 19 fev. 2019.
- Kahraman, C. Multi-criteria decision making methods and fuzzy sets. In: Springer Optimization and Its Applications. Springer International Publishing, 2008. v. 16p. 1–18.
- Kranz, J. Methodik und Richtlinien für die Konstruktion von laseradditiv gefertigten Leichtbaustrukturen. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2017.
- Kretschmar, N. et al. Evaluating the Readiness Level of Additively Manufactured Digital Spare Parts: An Industrial Perspective. Applied Sciences, v. 8, n. 10, p. 1837, 7 out. 2018.
- Leal, R. et al. Additive manufacturing tooling for the automotive industry. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 92, n. 5–8, p. 1671–1676, 16 set. 2017.
- Lima Junior, F. R. et al. A comparison between Fuzzy AHP and Fuzzy TOPSIS methods to supplier selection. Applied Soft Computing, v. 21, p. 194–209, 1 ago. 2014.
- Liu, R. et al. Aerospace applications of laser additive manufacturing. In: Laser Additive Manufacturing. Elsevier, 2017. p. 351–371.
- Malekipour, E. e El-Mounayri, H. Common defects and contributing parameters in powder bed fusion AM process and their classification for online monitoring and control: a review. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 95, n. 1–4, p. 527–550, 27 mar. 2018.
- Masuch, T. Concept Laser GmbH-A World First: Additively Manufactured Titanium Components Now Onboard the Airbus A350 XWB. Disponível em: <<https://www.etmm-online.com/a-world-first-additively-manufactured-titanium-components-now-onboard-the-airbus-a350-xwb-a-486310/>>. Acesso em: 10 jun. 2020.
- Milewski, J. O. Additive manufacturing of metals. From Fundamental Technology to Rocket Nozzles, Medical Implants, and Custom Jewelry. Springer Verlag, 2017. v. 258
- Nădăban, S. et al. Fuzzy TOPSIS: A General View. Procedia Computer Science, v. 91, p. 823–831, 1 jan. 2016.
- Portolés, L. et al. A qualification procedure to manufacture and repair aerospace parts with electron beam melting. Journal of Manufacturing Systems, v. 41, p. 65–75, 1 out. 2016.
- Salmi, A. et al. An integrated design methodology for components produced by laser powder bed fusion (L-PBF) process. Virtual and Physical Prototyping, v. 13, n. 3, p. 191–202, 3 jul. 2018.
- Schmidt, M. et al. Laser based additive manufacturing in industry and academia. CIRP Annals, v. 66, n. 2, p. 561–583, 1 jan. 2017.
- Shapiro, A. A. et al. Additive Manufacturing for Aerospace Flight Applications. Journal of Spacecraft and Rockets, v. 53, n. 5, p. 952–959, 5 set. 2016.
- Strong, D. et al. Hybrid manufacturing – integrating traditional manufacturers with additive manufacturing (AM) supply chain. Additive Manufacturing, v. 21, p. 159–173, 1 maio 2018.
- Weber, A. Additive manufacturing takes off in aerospace Industry. Assembly, v. 59, n. 1, 2016.
- Wimpenny, D. I.; PANDEY, P. M.; JYOTHISH KUMAR, L. Advances in 3D Printing & Additive Manufacturing Technologies. Singapore: Springer Singapore, 2017.
- Zadpoor, A. Frontiers of Additively Manufactured Metallic Materials. Materials, v. 11, n. 9, p. 1566, 30 ago. 2018.

9. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.

Comparison and Ordination of preference between Additive Manufacturing (AM) Processes and Conventional Machining for Aeronautical parts manufacturing using the Fuzzy TOPSIS Method

Abstract. The production of metal parts for the aeronautical industry requires structures with high quality and mechanical properties compatible with the applications. Currently, additive manufacturing (AM) for metals has been used for the production of these parts, and the Powder Bed Fusion (PBF) and Laser Directed Energy Deposition (DED) processes are the most explored. The objective of this work was to use the Fuzzy TOPSIS decision-making method comparing the processes PBF, DED, and conventional machining for the manufacture of a given aeronautical part, deciding among them which one is more appropriate according to the application specifications. The results showed that the decision must still be made by conventional machining, according to the criteria of most significant impact: dimensional precision, mechanical properties, and surface finish, required in aeronautical applications. The AM processes, PBF and DED, without post-processing, are still not able to satisfy the requirements of this market without the use of machining as post-processing. These data show that improvements in these AM processes, or the use of Hybrid Manufacturing (HM), including machining processes, should be the way for AM to be more widely adopted in the aeronautical industry.

Keywords: Additive Manufacturing, PBF, DED, Fuzzy-TOPSIS, Aeronautical Industry.