

PLANEJAMENTO DE PROCESSO NA MANUFATURA ADITIVA POR EXTRUSÃO: UMA ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA E SISTÊMICA

Jaqueline Sebastiany Iaksch

Neri Volpato

Milton Borsato

Arturo Vaine

Marcelo Okada Shigueoka

Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) - Rua. Dep. Heitor Alencar Furtado, 5000 - Campo Comprido, Curitiba/PR, CEP: 81280-340

jaquelineiaksch@alunos.utfpr.edu.br

nvolpato@utfpr.edu.br

borsato@utfpr.edu.br

arturovaine@alunos.utfpr.edu.br

mshigueoka@gmail.com

Resumo. Os desafios da concorrência global, a diminuição do ciclo de vida dos produtos, as crescentes mudanças tecnológicas e o aumento do nível de exigência dos clientes vem sendo intensificados nas últimas décadas. Neste contexto, os processos de Manufatura Aditiva (AM) destacam-se por proporcionar liberdade de design e pela eficiência do material, e vem sendo aplicada amplamente em diversas áreas, como na indústria e saúde. O princípio de AM por extrusão de material (onde se enquadra a técnica Fused Deposition Modeling - FDM) mostra um grande potencial de fabricação de produtos, com a capacidade de competir com técnicas convencionais de processamento de polímeros. Dessa maneira, esse artigo tem como objetivo identificar as soluções propostas e as tendências acerca do planejamento de processos de AM por extrusão de material, através da revisão da literatura com base nos estudos realizados nos últimos três anos, apresentando e analisando as lacunas existentes na literatura sobre o tema em questão. Para alcançar esses objetivos, o presente estudo se baseou no processo ProKnow-C (Knowledge Development Process – Constructivist) e realizou a revisão crítica de 36 artigos.

Palavras chave: Bibliometria. Manufatura Aditiva. FDM. Planejamento de Processos.

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, o desenvolvimento industrial tem apresentado grande competitividade das empresas para atender as necessidades dos clientes, e neste contexto de demanda, a qualidade, a rapidez e os preços de entrega são mandatórios (Huynh et al., 2017). Como consequência destes requisitos de projetos, houve recente avanço na utilização de tecnologias baseadas em Manufatura Aditiva, ou AM (abreviação do termo em inglês, *Additive Manufacturing*) (Brenken et al., 2019). A AM se tornou popular principalmente pela liberdade de design, bem como propriedades e redução dos custos dos materiais compatíveis à tecnologia, e tem sido aplicada amplamente em diversas áreas. Além disto, outros diferenciais que se destacam: o custo-máquina de produção competitivo para pequenos lotes, em comparação a processos tradicionais de fabricação (Leary et al., 2014), e rapidez operacional no planejamento de processos (Eiliat; Urbanic, 2016).

Um dos maiores fatores de influência à popularização da AM foi a proliferação de projetos de hardware de código aberto. De forma similar ao contexto de softwares de código aberto, o desenvolvimento de hardware de código aberto permite liberdade de acesso a determinado projeto, para estudo, modificação e reprodução do mesmo (Tech et al., 2016). Neste contexto é que surgiu uma das primeiras comunidades de desenvolvimento de máquinas de prototipagem rápida autoreplicantes: a RepRap. A primeira máquina RepRap primeiramente reproduzida foi fabricada em 2008 na Universidade de Bath, na Inglaterra. Estimativas indicam de que foram produzidas cerca de 4500 máquinas RepRap ao redor do mundo em menos de tres anos após o início da comunidade (Jones et al., 2011).

Como contraponto às vantagens destas tecnologias pode-se citar: opções ainda limitadas de materiais aplicáveis em determinados processos, necessidade de pós-processamento das peças, custos proibitivos na economia de escala, tempo de construção da peça, anisotropia, qualidade superficial e acurácia dimensional (Eiliat; Urbanic, 2016). No entanto, a utilização de AM na produção de peças para uso final tem sido recorrente nos dias atuais, o que exige significativa repetibilidade de características dimensionais e de propriedades mecânicas. Para satisfazer esses requisitos, a variabilidade do processo deve ser reduzida e as relações entre os parâmetros do processo e as propriedades da peça final precisam ser determinadas coerentemente (Komarnicki, 2017).

A AM engloba diversos métodos ou princípios de adição de material, no entanto, a base inicial dos processos situa-se em modelos geométricos 3D, que servem de referência para a condução destes diversos processos de adição de material

(Huynh et al., 2017). Um destes princípios é o de adição de material, sendo a tecnologia *Fused Deposition Modeling* (FDM) a pioneira (Volpato, 2017). Este princípio apresenta um grande potencial de fabricação de produtos, com a capacidade de competir com técnicas convencionais de processamento de polímeros. As tecnologias de princípio formam uma geometria 3D montando camadas individuais de filamentos termoplásticos extrudados, tais como Acrilonitrilo-butadieno-estireno (ABS) ou Ácido Polilático (PLA). No entanto, ainda existem diversos desafios no planejamento de processos de AM que requerem estudos substanciais (Akessa et al., 2017).

Os processos de fabricação por AM se iniciam pela conversão do modelo geométrico tridimensional CAD em formato compatível (geralmente .stl) com processos AM. Em seguida é realizado o planejamento de processo, a fabricação da peça e o pós-processamento (Zha; Anand, 2015). O planejamento de processo é composto por diversas etapas que auxiliam a minimizar as características não desejadas e inerentes a esse tipo de processo de fabricação como: efeito degrau de escada, desvios de trajetória em relação à geometria original, propriedades mecânicas dependentes da orientação de solicitação (anisotropia), e construção de base e estruturas de suporte (Chacón et al., 2017; Volpato e da Silva, 2017).

A primeira etapa do planejamento consiste em definir a orientação de construção da peça em relação aos eixos de referência da máquina. É nessa etapa que se define: quais as regiões ou detalhes da peça serão mais ou menos afetadas pelo efeito degrau de escada, quais regiões terão maior precisão dimensional, se será necessária a construção de suportes, que afetam tempo e custo de processo (Chacón et al., 2017). A etapa seguinte trata do fatiamento da peça, quando são geradas as camadas do modelo, baseadas na malha triangular do modelo geométrico. Nessa etapa é definida a espessura de camada, que afeta diretamente o tempo e o custo de fabricação (Wasserfall et al., 2017). Quanto menos suporte for construído, menor o tempo e o custo final da peça, bem como melhor o acabamento superficial (Das et al., 2015). Em seguida, é realizado o planejamento de trajetória de contorno e preenchimento. Onde o contorno concede o formato à peça e o preenchimento a resistência da mesma (Ding et al., 2016). Os objetos impressos com material de suporte exigem operações de pós-processamento que os mesmos sejam retirados. O método de retirada desse material depende da tecnologia AM de impressão e material utilizado. A fim de garantir o acabamento superficial, as peças impressas muitas vezes precisam ser polidas usando lixamento (Chacón et al., 2017).

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Este artigo tem como objetivos: identificar soluções propostas e as tendências a respeito do planejamento de processos AM por extrusão de material, através da revisão da literatura com base nos estudos realizados nos últimos três anos, apresentar e analisar as lacunas existentes na literatura sobre o tema em questão. Para alcançar esses objetivos, o estudo realizou a revisão crítica de 36 artigos.

Segundo Gil (2002), as pesquisas podem ser classificadas em três grupos de acordo com seus objetivos: estudos exploratórios, estudos descritivos e estudos que verificam hipóteses causais. De acordo com esta classificação, esta pesquisa é definida como exploratória tanto por seus objetivos quanto pelos procedimentos adotados. Por seus objetivos, a pesquisa busca a caracterização, classificação e definição inicial de um problema. Já em seus procedimentos, ela recupera o conhecimento científico acumulado sobre determinado problema, tornando o problema mais trivial para o pesquisador.

Escolheu-se adotar nesta pesquisa o *ProKnow-C* (*Knowledge Development Process – Constructivist*) como procedimento metodológico (Ensslin et al., 2010). O *ProKnow-C* é constituído pelos seguintes passos: seleção do portfólio bibliográfico, seguido da análise bibliométrica, análise sistêmica do portfólio e por fim, definição da pergunta e objetivo da pesquisa respectivamente (Ensslin et al., 2007; Ensslin et al., 2010). A Figura 1 representa essas etapas.

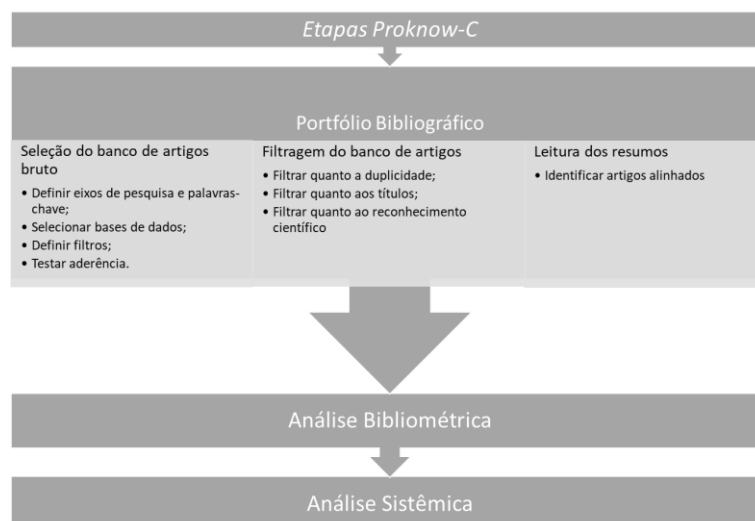


Figura 1. Etapas adotadas nesta pesquisa (Os autores baseados em Ensslin et al. (2010))

Na primeira etapa, definição do portfólio bibliográfico, são definidos os eixos de pesquisa e as palavras-chave, bem como as bases de dados, e então são realizadas as buscas. Após essa busca, inicia-se a etapa de análise bibliométrica, a qual define os autores, artigos, periódicos e as palavras-chave mais relevantes ao tema objeto de pesquisa. A terceira etapa, análise sistêmica, consiste na interpretação dos artigos do portfólio bibliográfico. Neste artigo serão abordadas apenas as três primeiras etapas do *ProKnow-C*, visto que se pretende com este estudo apresentar o estado da arte e as oportunidades de pesquisa baseadas na etapa de análise sistêmica. Para se chegar a este resultado serão utilizados os softwares *Mendeley* e o *Microsoft Excel*. O *Mendeley* auxilia no gerenciamento da bibliografia, enquanto no *Excel* é realizada a tabulação dos dados.

2.1. Seleção do Portfólio Bibliográfico

Esta etapa, de seleção da base bruta de artigos, é composta pelas seguintes atividades: definição de eixos de pesquisa e palavras-chave; seleção da base de dados; definição de filtros limitantes de pesquisa; teste de aderência das palavras-chave, e v) formar o banco de artigos bruto. Os eixos foram definidos como: (i) Planejamento de Processos; (ii) Manufatura Aditiva e (iii) Extrusão de Material. Estes eixos foram definidos de acordo com o objetivo do estudo de identificar as tendências sobre planejamento de processos AM utilizando tecnologia FDM. Para cada eixo de pesquisa foram definidas palavras-chave (em inglês, por sua abrangência em periódicos internacionais), por meio da leitura prévia de alguns artigos alinhados a pesquisa. Os eixos de pesquisa e suas palavras-chave podem ser observados na Tabela 1.

A fim de associar as palavras-chave e os eixos de pesquisa nas bases de dados, fez-se necessário utilizar os operadores booleanos “AND” e “OR” para. Assim, as buscas foram realizadas com a seguinte combinação: TITLE-ABS-KEY(("additive manufacturing" OR "rapid prototyping" OR "3D printing" OR "layered printing") AND ("fused deposition" OR "FDM" OR "extrusion") AND ("process planning" OR "process parameters" OR "orientation" OR "position" OR "path planning" OR "support structure" OR "base" OR "slicing" OR "post-processing")).

Tabela 1. Eixo de pesquisa e palavra-chave (Os autores)

Eixo de Pesquisa	Palavra-chave
Planejamento de Processos	process planning
	process parameters
	orientation
	position
	path planning
	support structure
	base
	slicing
	post-processing
Manufatura Aditiva	additive manufacturing
	rapid prototyping
	3D printing
	layered printing
Extrusão de Material	fused deposition
	FDM
	Extrusion

As bases de dados foram definidas de acordo com o seu alinhamento relativo a área de interesse de pesquisa, bem como sua disponibilidade no portal de periódicos da CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior). Assim, as bases escolhidas foram: *Emerald*; *Science Direct*; *Web of Science*; *Scopus*; *ProQuest*. Quanto à representatividade da base de dados, definiu-se que caso a base retornasse ao menos um artigo ela seguiria no processo. A base *Web of Science* não retornou nenhum artigo, portanto foi excluída do processo. Na definição de filtros limitantes de pesquisa foram considerados apenas artigos, de congressos e periódicos, publicados nos últimos três anos (2016 a 2018). E quanto ao teste de aderência das palavras-chave foi realizada a leitura dos títulos dos artigos. Selecionou-se três artigos que estavam alinhados ao tema da pesquisa e verificou-se que as palavras-chave estavam alinhadas às definidas anteriormente.

Desta forma, a pesquisa seguiu utilizando as palavras-chave apresentadas anteriormente. Para formar o banco de artigos bruto, as buscas, de acordo com as definições expostas, foram realizadas entre os dias 26 e 30 de novembro de 2018 e resultaram num total de 396 referências. Todas as referências encontradas na etapa anterior foram exportadas para o software *Mendeley*, já que esta ferramenta auxilia o gerenciamento, análise e manipulação dos dados. Como atividade inicial nessa etapa de filtragem do banco de artigos, foram removidas todas as referências duplicadas, resultando em 394

artigos. Também foram detectados, apesar da pré-seleção realizada diretamente nas bases, a presença de 6 referências de anos anteriores aos considerados nessa pesquisa, bem como a presença de outros tipos de referências e documentos provenientes de outras áreas que não eram de interesse (medicina, biologia, etc.), restando, então, 380 referências.

Partiu-se então para a análise individual de cada artigo. Primeiramente, realizou-se a leitura de cada um dos 380 títulos presentes no portfólio, foram analisados quais estavam ou não alinhados com os objetivos e eixos da pesquisa. Excluiu-se os artigos que não estavam alinhados, restando 63 artigos para as análises seguintes. Após, esses artigos foram exportados para o *Microsoft Excel* e foi realizada uma nova filtragem para identificar o reconhecimento científico dos artigos. Através do site *Google Scholar*, foram verificados, no dia 6 de dezembro de 2018, os números de citações referentes a cada artigo. Tabulou-se as referências, classificando-as em ordem decrescente de número de citações, identificando quais os artigos eram os mais citados. O critério para selecionar artigos para a próxima etapa da análise foi que o mesmo deveria ser citado pelo menos uma vez. Com isso, 61 artigos foram escolhidos. Os artigos que não haviam sido citados foram separados até que se realizasse outra análise.

Então, de posse dos 61 artigos de maior reconhecimento científico, partiu-se para a etapa de leitura e avaliação dos seus resumos para selecionar os artigos que de fato estavam alinhados a pesquisa. Assim, restaram 36 publicações. Com esse portfólio, foram identificados os principais autores do tema da pesquisa. A fim de resgatar artigos que tivessem sido eliminados, mas que poderiam ser relevantes por terem sido escritos por estes autores, voltou-se ao portfólio de artigos com títulos alinhados. Nenhum artigo foi encontrado nessa nova avaliação.

2.2. Análise Bibliométrica do Portfólio Bibliográfico

A análise bibliométrica permite avaliar e interpretar o portfólio bibliográfico (Ensslin et al., 2007). Dessa forma, pode-se identificar a relevância dos periódicos e congressos acerca do tema de pesquisa, os autores que mais se destacam na área de pesquisa, o ano de publicação dos artigos, assim como analisar as palavras-chave encontradas no portfólio. Pôde-se perceber que a maioria das publicações foram escritas por autores diferentes. Com exceção dos autores A. Boschetto, B. Benes, L. Bottini, J. Du, Y. Hey, Y. Jin, N. Kim e J. Lee que possuem dois artigos no portfólio bibliográfico, os outros 115 autores escreveram apenas um artigo cada (no período analisado). A partir da análise dos anos de publicação dos artigos do portfólio, pode-se observar que em 2018 houve a maior quantidade de publicações a respeito do tema, confirmando o destaque do tema no meio acadêmico. Após o portfólio bibliográfico ser definido e a etapa de análise bibliométrica ser concluída, iniciou-se a etapa de análise sistêmica, a qual é apresentada na próxima seção.

2.3. Análise Sistêmica

A etapa de análise sistêmica concentrou-se na análise do conteúdo dos artigos do portfólio bibliográfico de acordo com os critérios pré-estabelecidos. Segundo Ensslin et al. (2007), análise sistêmica é um processo científico utilizado para analisar um portfólio bibliográfico, com o objetivo de identificar as oportunidades de pesquisa sobre o assunto em estudo. Nessa busca, todos os 36 artigos foram encontrados na base de periódicos da CAPES e no *Google Scholar*. Neste estudo, para realizar a análise sistêmica, foi realizada a leitura de cada um dos artigos selecionados para que fossem definidos os seguintes aspectos: (i) objetivo, (ii) metodologia, (iii) principais resultados, (iv) recomendações futuras, (v) oportunidades de pesquisa apontadas pelos autores; e (vi) oportunidades de pesquisa encontradas a partir de análise crítica.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os principais problemas de pesquisa apresentados foram relativos às propriedades mecânicas de peças, precisão dimensional, e qualidade superficial. A variação das propriedades mecânicas de peças fabricadas por AM utilizando tecnologia extrusão de material (FDM e semelhantes) depende de diversos fatores. O estudo realizado por Srivastava e Jain (2018) buscam demonstrar que a definição dos parâmetros de processo são fatores críticos para o sucesso na aplicação dos produtos. O estudo de Akessa et al. (2017) testam a resistência à tração e força de flexão em três pontos de corpos de prova, fabricados em ABS, variando os seguintes parâmetros de impressão: orientação, preenchimento e largura de varredura. Já Chacón et al. (2017) caracterizam o efeito da orientação de construção, espessura de camada e taxa de alimentação no desempenho mecânico de uma peça fabricada utilizando-se PLA e uma impressora de baixo custo. Abbott et al. (2016), Garg et al. (2017) e Mclouth et al. (2017) investigam as propriedades mecânicas (resistência à tração e à flexão) de partes construídas em 10 diferentes ângulos de varredura. Volpato e Zanotto (2018) discutiram a redução do tempo de fabricação pela otimização das trajetórias de deposição e chamaram a atenção para o impacto na resistência do material ao se alterar a sequência de deposição de material.

Um outro aspecto limitante para a difusão industrial é a precisão dimensional obtida através da AM, portanto Boschetto e Bottini (2016), Jo et al. (2016), Eswaran et al. (2018), e Ransikarbum e Kim (2018) estudaram uma maneira de melhorar este aspecto. Segundo Li et al. (2016), caso uma espessura de camada maior seja adotada no processo de fabricação AM, a precisão da superfície do produto será pior. A precisão das peças fabricadas por tecnologia AM de extrusão de material é influenciada por vários parâmetros do processo. O processo tem um mecanismo complexo na

construção de peças e, muitas vezes, há dificuldade em entender adequadamente como os parâmetros conflitantes determinarão a qualidade e a precisão da peça (Huynh et al., 2017). O erro volumétrico é basicamente a diferença volumétrica entre o modelo de design assistido por computador e a peça fabricada (Panda et al., 2017). Setores como implantes médicos, telecomunicações, eletrônicos e aeroespacial exigem, cada vez mais, níveis elevados de precisão dimensional. Assim, os métodos tradicionais de garantir a qualidade não atendem efetivamente aos mercados globais e às necessidades dos clientes (Mohamed et al., 2016).

Por fim, destacou-se o impacto da qualidade superficial, analisada por meio da rugosidade obtida em AM (Boschetto; Bottini, 2016). Essa limitação implica na necessidade de utilização de operações de acabamento para cumprir os requisitos de design para satisfazer um acoplamento mecânico ou funcionalidade (Boschetto et al., 2016a). Este problema se torna muito mais crítico ao se fabricar superfícies com detalhes mínimos, porém sensíveis ao uso funcional (Jin et al., 2017). Neste sentido, a literatura reconhece que a qualidade da peça pode ser aprimorada por meio da seleção de uma orientação de construção apropriada, e que corresponda a um erro volumétrico mínimo (Panda et al., 2017).

Os objetivos e os recursos utilizados para abordar e solucionar esses problemas são apresentados a seguir: auxílio da etapa de *path planning*, minimização de estruturas de suporte, otimização de parâmetros de processo, auxílio em etapas de fatiamento. Eiliat e Urbanic (2016) apresentam um modelo matemático capaz de encontrar a orientação *raster* e as larguras ideais com base na geometria da fatia da peça. Em particular, os artigos de Akessa et al. (2017) e Giberti et al. (2017) apresentam uma tecnologia de planejamento de trajetória desenvolvida para uma velocidade constante ao longo da trajetória que visa melhorar os processos de tecnologia aditiva. Huynh et al. (2017) buscam otimizar a densidade de preenchimento usando Método de Taguchi com o objetivo de melhorar a precisão dos produtos fabricados em PLA. Além desses estudos, Jin et al. (2017) propõem métodos para diminuir o número de cantos agudos utilizando algoritmos para suavizar os caminhos de contorno gerados e preencher seções transversais longas através de um padrão ondulado. Assim, esses trabalhos buscam através de estratégias de *path planning* melhor acabamento superficial e precisão dimensional.

Alguns dos objetivos e desenvolvimento de métodos apresentados são voltados para a minimização de estruturas de suporte, reduzindo tempo e custo de fabricação, além da melhoria da qualidade superficial. Mirzendehtdel e Suresh (2016) propõem uma estrutura de otimização de topologia de suportes, introduzindo uma nova abordagem para restringir o volume da estrutura de suporte durante a otimização do projeto. O estudo de Lee (2017) particiona a peça em blocos, formas complexas são convertidas em formas mais simples, minimizando a estrutura de suporte interno. Já Boyard et al. (2018) propõem um método dedicado à geração de suporte, integrado ao software CAD, com o objetivo de minimizar o volume de suporte e seu impacto no acabamento da superfície da peça. Ainda nessa linha, García et al. (2018) criam um algoritmo para minimizar as áreas suspensas/vazias da peça, através da orientação da peça, diminuindo, assim, a necessidade de estruturas de suporte. Outro estudo, criou uma plataforma que, durante o processo de impressão, pode formar tipos de estruturas de suporte diferentes (Hongyao et al., 2018).

Boschetto et al. (2016a) procuram desenvolver uma metodologia integrada capaz de auxiliar o projeto do processo, com o objetivo de atender aos requisitos do produto. Através do desenvolvimento de um método que permita o conhecimento prévio da qualidade superficial do produto fabricado por FDM com os parâmetros de processo escolhidos, tornando possível uma verificação antes da fabricação do produto. Mohamed et al. (2016) propõem um critério para a otimização de parâmetros de processo de extrusão de material, a fim de abordar as limitações dos projetos tradicionais comumente usados, desenvolvendo modelos matemáticos para estabelecer relações não-lineares entre parâmetros de processo e precisão dimensional. No trabalho de Brenken et al. (2019) criou-se uma ferramenta de simulação de processo (*Additive3D*) para modelar o processo de fabricação, podendo prever deformações e tensões residuais de peças devido ao processo de impressão e anisotropia do material. Já na pesquisa de Ransikarbum e Kim (2018) estuda-se o problema de tomada de decisão em nível operacional para a seleção da orientação ótima da peça 3D.

Na etapa de fatiamento, a espessura da camada desempenha um papel vital na determinação da qualidade da superfície e do tempo de fabricação nos processos FDM (Wang et al., 2018). Li et al. (2016) adota o algoritmo de fatiamento adaptativo para resolver este conflito.

Boschetto e Bottini (2016) elaboraram um estudo em que o objetivo é o desenvolvimento de um projeto para metodologia de fabricação capaz de melhorar a precisão dimensional obtida pela tecnologia de extrusão de material. Ele opera na etapa do modelo de design executando um pré-processamento do modelo: um deslocamento anisotrópico é aplicado às superfícies, definido por uma formulação matemática, a fim de compensar os desvios dimensionais.

Boschetto et al. (2016b) desenvolveram uma metodologia para pós-processamento através da utilização de CNC. Nessa mesma linha, Jo et al. (2016) dedicaram-se a melhorar a resistência e a estanqueidade do material através da aplicação de uma resina na peça pronta, na etapa de pós-processamento.

No trabalho de Alsharhan et al. (2017) é apresentado um processo de AM não planar baseado em extrusão. O processo permite a deposição de material ao longo de caminhos tridimensionais, fornecendo a capacidade de reorientar o bico extrusor, construir objetos em plataformas curvas e criar estruturas completas usando um fio contínuo. Cummings et al. (2017) introduzem, em seu estudo, o uso de excitação ultrassônica como um meio de detectar falhas de ligação de filamento introduzidas pela manipulação da temperatura do leito de impressão durante o processo FDM. Além disso, Dinda et al. (2017) apresentam algoritmos de software e um aplicativo (*App*) para ajudar os usuários a avaliar a viabilidade de fabricar peças usando extrusão de material, e Rebaioli et al. (2019) implementam uma plataforma para fabricação de

grandes objetos. O estudo de Yang et al. (2016) apresenta um novo método de processamento de polímeros com memória de forma (SMP) para manufatura aditiva.

4. CONCLUSÕES

Apresentou-se de forma estruturada a revisão de literatura sobre o tema planejamento de processos AM para tecnologias AM de Extrusão de material (FDM e similares), identificando o estado da arte e as oportunidades de pesquisa sobre o tema, através do instrumento *ProKnow-C*. Inicialmente, foram encontrados 396 artigos nas bases de dados, publicados entre 2016 e 2018. Dando continuidade a metodologia utilizada, foi realizada a análise bibliométrica das publicações, que resultou num portfólio bibliográfico de 36 artigos.

Ao longo da realização deste trabalho foram encontradas algumas dificuldades. A primeira relacionada a busca nas bases de dados, pois cada base possui uma maneira singular de se proceder a pesquisa, bem como importar as referências, sendo necessário em algumas bases a importação manual, uma a uma, das referências. Além disso, o procedimento metodológico adotado nesse estudo exige que o pesquisador registre cada etapa executada, o que torna o processo trabalhoso. Recomenda-se no futuro realizar novamente todas as etapas do método incluindo-se a análise das referências dos artigos que constituem o portfólio bibliográfico, o que poderia agregar valor à análise de bibliométrica e sistêmica por meio de trabalhos relevantes em um período de tempo maior.

5. REFERÊNCIAS

- Abbott, A. C.; Tandon, G. P.; Bradford, R. L.; Koerner, H.; Baur, J. W., 2016. "Process parameter effects on bond strength in fused filament fabrication." In *International SAMPE Technical Conference*. Anais Vol. 2016.
- Akessa, A. D.; Lemu, H. G.; Gebisa, A. W., 2017. "Mechanical property characterization of additive manufactured ABS material using design of experiment approach." In *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Proceedings (IMECE)*. Anais Vol. 14.
- Alsharhan, A. T.; Centea, T.; Gupta, S. K., 2017 "Enhancing mechanical properties of thin-walled structures using non-planar extrusion based additive manufacturing". In *ASME 2017 12th International Manufacturing Science and Engineering Conference - MSEC 2017 collocated with the JSME/ASME 2017 6th International Conference on Materials and Processing*. Anais Vol. 2.
- Boschetto, A.; Bottini, L., 2016 "Design for manufacturing of surfaces to improve accuracy in Fused Deposition Modeling." *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 37, p. 103–114.
- Boschetto, A.; Bottini, L.; Veniali, F., 2016. "Integration of FDM surface quality modeling with process design." *Additive Manufacturing*, Vol. 12, p. 334–344.
- Boschetto, A.; Bottini, L.; Veniali, F., 2016 "Finishing of Fused Deposition Modeling parts by CNC machining." *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 41, p. 92–101.
- Boyard, N.; Christmann, O.; Rivette, M.; Kerbrat, O.; Richir, S., 2018. "Support optimization for additive manufacturing: Application to FDM." *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 24, n. 1, p. 69–79.
- Brenken, B.; Barocio, E.; Favaloro, A.; Kunc, V.; Pipes, R. B., 2019. "Development and validation of extrusion deposition additive manufacturing process simulations." *Additive Manufacturing*, Vol. 25, p. 218–226.
- Chacón, J. M.; Caminero, M. A.; García-Plaza, E.; Núñez, P. J., 2017. "Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling: Effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection." *Materials and Design*, Vol. 124, p. 143–157.
- Cummings, I. T.; Bax, M. E.; Fuller, I. J.; Wachtor, A. J.; Bernardin, J. D., 2017. "A framework for additive manufacturing process monitoring & control". In *Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series*. Anais, Vol. 10B, p.137–146.
- Das, P.; Chandran, R.; Samant, R.; Anand, S., 2015. "Optimum Part Build Orientation in Additive Manufacturing for Minimizing Part Errors and Support Structures." *Procedia Manufacturing*, Vol. 1, p. 343–354.
- Dinda, S.; Modi, D.; Simpson, T. W.; Tedia, S.; Williams, C. B., 2017. "Expediting build time, material, and cost estimation for material extrusion processes to enable mobile applications." In *Proceedings of the ASME Design Engineering Technical Conference*. Anais. Vol. 2A–2017.
- Ding, D.; Pan, Z.; Cuiuri, D.; Li, H.; Larkin, N., 2016. "Adaptive path planning for wire-feed additive manufacturing using medial axis transformation." *Journal of Cleaner Production*, Vol. 133, p. 942–952.
- Eiliat, H.; Urbanic, J., 2016. "Minimizing voids with using an optimal raster orientation and bead width for a material extrusion based process." In *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Proceedings (IMECE)*. Anais, Vol. 2.
- Ensslin, L.; Ensslin, S. R.; Vianna, W. B., 2007. "O design na pesquisa quali-quantitativa em engenharia de produção – questões a considerar." *Revista Gestão Industrial*, Vol. 3, p. 172–185.
- Eswaran, P.; Sivakumar, K.; Subramaniyan, M., 2018. "Minimizing error on circularity of FDM manufactured part." In *M. V Sivaprasad K. (Org.); Materials Today: Proceedings*. Anais. Vol. 5, p.6675–6683.

- García Galicia, J. A.; Benes, B.; Galicia, J. A. G.; Benes, B., 2018. "Improving printing orientation for Fused Deposition Modeling printers by analyzing connected components." *Additive Manufacturing*, Vol. 22, p. 720–728.
- Garg, A.; Bhattacharya, A.; Batish, A., 2017. "Failure investigation of fused deposition modelling parts fabricated at different raster angles under tensile and flexural loading." *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 231, n. 11, p. 2031–2039.
- Giberti, H.; Sbaglia, L.; Urgo, M., 2002. "A path planning algorithm for industrial processes under velocity constraints with an application to additive manufacturing." *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 43, p. 160–167.
- Gil, A. C., 2002. *Como elaborar projetos de pesquisa*. São Paulo: Atlas, 5ª edição.
- Hongyao, S.; Xiaoxiang, Y.; Jianzhong, F., 2018. "Research on the flexible support platform for fused deposition modeling." *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 97, n. 9–12, p. 3205–3221.
- Huynh, H. N.; Nguyen, A. T.; Ha, N. L.; Ha Thai, T. T., 2017. "Application of fuzzy Taguchi method to improve the dimensional accuracy of Fused Deposition Modeling processed product." In *Proceedings - 2017 International Conference on System Science and Engineering, ICSSE 2017*.
- Jin, Y.; Du, J.; He, Y.; Fu, G., 2017. "Modeling and process planning for curved layer fused deposition." *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 91, n. 1–4, p. 273–285.
- Jin, Y.; Du, J.; Ma, Z.; Liu, A.; He, Y., 2017. "An optimization approach for path planning of high-quality and uniform additive manufacturing." *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 92, n. 1–4, p. 651–662.
- Jin, Y.; He, Y.; Du, J., 2017. "A novel path planning methodology for extrusion-based additive manufacturing of thin-walled parts." *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, Vol. 30, n. 12, p. 1301–1315.
- Jo, K.-H.; Jeong, Y.-S.; Lee, J.-H.; Lee, S.-H., 2016. "A study of post-processing methods for improving the tightness of a part fabricated by fused deposition modeling." *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 17, n. 11, p. 1541–1546.
- Komarnicki, P., 2017. "A review of fused deposition modeling process models." *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, p. 241–247.
- L. Ensslin, S. R. Ensslin, W. B. V., 2010. *ProKnow-C, knowledge development process-constructivist*. Processo técnico com patente de registro pendente junto ao INPI., Vol. 10.
- Leary, M.; Merli, L.; Torti, F.; Mazur, M.; Brandt, M., 2014. "Optimal topology for additive manufacture: A method for enabling additive manufacture of support-free optimal structures." *Materials & Design*, Vol. 63, p. 678–690.
- Lee, J.; Lee, K., 2017. "Block-based inner support structure generation algorithm for 3D printing using fused deposition modeling." *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 89, n. 5–8, p. 2151–2163.
- Li, H.; Wang, T.; Sun, J.; Yu, Z., 2016. "The adaptive slicing algorithm and its impact on the mechanical property and surface roughness of freeform extrusion parts." *Virtual and Physical Prototyping*, Vol. 11, n. 1, p. 27–39.
- Mclouth, T. D.; Severino, J. V.; Adams, P. M.; Patel, D. N.; Zaldivar, R. J., 2017. "The impact of print orientation and raster pattern on fracture toughness in additively manufactured ABS." *Additive Manufacturing*, Vol. 18, p. 103–109.
- Mirzendehtdel, A. M.; Suresh, K., 2016. "Support structure constrained topology optimization for additive manufacturing." *CAD Computer Aided Design*, Vol. 81, p. 1–13.
- Mohamed, O. A.; Masood, S. H.; Bhowmik, J. L., 2016. "Optimization of fused deposition modeling process parameters for dimensional accuracy using I-optimality criterion." *Journal of the International Measurement Confederation*, Vol. 81, p. 174–196.
- Panda, B. N.; Bahubalendruni, R. M. V. A.; Biswal, B. B.; Leite, M., 2017. "A CAD-based approach for measuring volumetric error in layered manufacturing." In *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, Vol. 231, n. 13, p. 2398–2406.
- Ransikarbum, K.; Kim, N., 2017 "Multi-criteria selection problem of part orientation in 3D fused deposition modeling based on analytic hierarchy process model: A case study." In *IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*. Vol. 2017–December, p.1455–1459.
- Rebaioli, L.; Magnoni, P.; Fassi, I.; Pedrocchi, N.; Molinari Tosatti, L., 2019. "Process parameters tuning and online re-slicing for robotized additive manufacturing of big plastic objects." *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 55, p. 55–64.
- Rhys, J., Haufe, P., Sells, E., Iravani, P., Olliver, V., Palmer, C., Bowyer, A., 2011. RepRap – the replicating rapid prototyper. *Robotica*, Vol. 29, p. 177–191.
- Rolim Ensslin, S.; Eduardo Tasca, J.; Ensslin, L.; Bernardete Martins Alves, M., 2010. "An approach for selecting a theoretical framework for the evaluation of training programs." *Journal of European Industrial Training*, Vol. 34, n. 7, p. 631–655.
- Srivastava, A. K.; Jain, P. K., 2018. "Controlling localised properties in fused deposition modelling parts: A feasibility study." In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vol. 404.
- Tech, R. P. G., Ferdinand, J.-P., & Dopfer, M., 2016. Open Source Hardware Startups and Their Communities. *The Decentralized and Networked Future of Value Creation*, p.129–145.

- Volpato, N., 2017. Processos de AM por extrusão de material. In: Volpato, N. (Org.). Manufatura aditiva: tecnologias e aplicações da impressão 3D. Edgard Blücher, p.145-178.
- Volpato, N.; Silva, J. V. L., 2017. Planejamento de processo para tecnologias de AM. In: Volpato, N. (Org.). Manufatura aditiva: tecnologias e aplicações da impressão 3D. Edgard Blücher, p. 97-127.
- Volpato, N.; Zanotto, T. T., 2018. Analysis of deposition sequence in tool-path optimization for low-cost material extrusion additive manufacturing. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 1, p. 1-9.
- Wang, X.; Zhang, C.; Liu, T., 2018. "A Topology Optimization Algorithm Based on the Overhang Sensitivity Analysis for Additive Manufacturing." In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Anais. Vol. 382.
- Wasserfall, F.; Hendrich, N.; Zhang, J., 2017. "Adaptive slicing for the FDM process revisited." In *2017 13th IEEE Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*. Anais. p.49–54.
- Yang, Y.; Chen, Y.; Wei, Y.; Li, Y., 2016. "3D printing of shape memory polymer for functional part fabrication." *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 84, n. 9–12, p. 2079–2095.
- Zha, W.; Anand, S., 2015. "Geometric approaches to input file modification for part quality improvement in additive manufacturing." *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 20, p. 465–477.

5. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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

PROCESS PLANNING IN ADDITIVE MANUFACTURING BY MATERIAL EXTRUSION TECHNOLOGIES: A BIBLIOMETRIC AND SYSTEMIC ANALYSIS

Abstract. *The challenges of global competition, shortening the product lifecycle, growing technological changes and increasing customer demand have been intensifying in recent decades. In this context, Additive Manufacturing (AM) processes stand out for providing design freedom and material efficiency. The AM based on the material extrusion principle (among them the Fused Deposition Modeling - FDM) shows a great potential to manufacture products, with the ability to compete with conventional polymer processing techniques. Thus, this article aims to identify the proposed solutions and trends in the processes planning of material extrusion AM, by reviewing the literature based on the studies carried out in the last three years, presenting and analyzing the existing gaps in the literature. The present study was based on ProKnow-C (Knowledge Development Process - Constructivist) and reviewed 36 articles.*

Keywords: *Bibliometric. Additive Manufacturing. Fused Deposition Modeling (FDM). Process Planning.*

RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.