**Revisão Bibliográfica Sistemática sobre processos aditivos por extrusão utilizando cabeçotes com rosca**

**Dávila Moreira Lopes Silva1, Joaquim Manoel Justino Netto2**

**Zilda de Castro Silveira3**

1Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, Brasil. Email: davilamlopes@usp.br

2 Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, Brasil. Email: joaquimnetto.emm@gmail.com

3Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, Brasil. Email: silveira@sc.usp.br

**Resumo**

Este trabalho apresenta uma revisão bibliográfica sistemática para sistemas de impressão 3D baseados em roscas aplicados à técnica aditiva por extrusão, utilizando como matéria-prima materiais particulados. A investigação foi realizada com ênfase nas áreas de aplicação dessa tecnologia, nos materiais processados, na modelagem termomecânica, no monitoramento dos dispositivos de extrusão, e nos sistemas de controle desenvolvidos. A ferramenta SPIDER (*Sample, Phenomenon of interest, Design, Evaluation, Research Type*) foi aplicada para o direcionamento do método de busca dos estudos. O método de busca da revisão sistemática resultou em 72 artigos científicos, que indicaram lacunas de pesquisa no projeto e na implementação de sistemas de extrusão para impressão 3D monoroscas com seções de mistura; e no desenvolvimento de sistemas de controle *on line* integrados com modelos matemáticos para previsão da qualidade de impressão. Além disso, verificou-se que os sistemas de monitoramento do cabeçote são majoritariamente baseados em sensores não invasivos.

**Palavras - chave:** impressão 3D, extrusão à quente, monitoramento, controle.

**Abstract**

This paper presents a systematic review on 3d printers based on screw extrusion fed with granulared, pelletized, or powdered feedstock. The investigation focused on the application areas of this technology, processed materials, thermo mechanical modeling, extrusion monitoring, and control systems. The SPIDER (Sample, Phenomenon of Interest, Design, Evaluation, and Research Type) tool was applied to guide the article search method. The systematic review resulted in 72 papers, which indicated research gaps in the design and implementation of single screw extrusion systems for 3D printing containing mixing sections printing with mixing elements; and in the development of on-line control systems integrated with mathematical models to predict extrusion quality. In addition, it was observed that the available monitoring systems are mostly based on non-intrusive sensors.

**Keywords:** 3D printhead, hot melt end, process monitoring; process control.

# Introdução

O processamento de materiais de base polimérica por meio de sistemas mecânicos baseado em rosca tem sido explorado desde o século XIX. Contudo, foi no período pós Segunda Guerra Mundial, com o advento de técnicas de catalisação, especialmente aquelas baseadas em catalisadores metalocênicos, que uma ampla gama de novos materiais poliméricos foram desenvolvidos. O surgimento desse conjunto de materiais revelou a necessidade do desenvolvimento de novas técnicas e do aperfeiçoamento de técnicas já existentes que fossem capazes de processá-los e de dá-los forma [1, 2]. Foi nesse cenário que a extrusão de termoplásticos baseada em rosca tornou-se mais relevante industrial, acadêmica e comercialmente.

A tecnologia de extrusão por rosca de termoplásticos possui bastante destaque~~,~~ dentre as técnicas de processamento desse grupo materiais~~,~~ por ser capaz de transportar, plastificar, homogeneizar [3, 4], catalisar reações químicas [5, 6] e desvolatizar sistemas poliméricos [7, 8]. Devido a isto, há mais de oito décadas, extrusoras baseadas em rosca têm sido aplicadas em diferentes setores industriais, sendo os de maiores destaques a Indústria Plástica [9], a Indústria Alimentícia [10] e a Indústria Farmacêutica [11].

O mecanismo de extrusão baseado em rosca tem sido explorado em cabeçotes aplicados no contexto de técnicas aditivas de manufatura de materiais com base polimérica nos últimos 18 anos [12]. O uso desta técnica tem ganhado espaço no contexto da Manufatura Aditiva por Extrusão (MAE) especialmente por ser uma alternativa para a impressão a partir de matérias-primas em pó, grânulos ou pellets, o que amplia a gama de materiais disponíveis para impressão 3D capazes a serem processados livres da necessidade de serem transformados em filamento, um requisito da técnica aditiva FFF (*Fused Filament Fabrication*). Além disso, é sugerido que técnicas aditivas de extrusão por roscas ofereçam maior capacidade de controle sobre as propriedades finais dos produtos obtidos e maior taxa de deposição do material [13, 14, 15, 16].

Gutierrez et al. (2018) [17] desenvolveram uma revisão narrativa não estruturada sobre o processo MAE com materiais compósitos de matriz polimérica e reforços metálicos Neste estudo, ele apresenta uma breve análise sobre as técnicas baseadas em rosca, em que apenas três artigos acadêmicos são investigados e duas máquinas comerciais são apresentadas. Por outro lado, Justino Netto et al. (2020) [12], apresenta uma revisão sistemática bem estruturada em que mais de sessenta artigos foram avaliados. Este estudo sintetiza informações fundamentais, especialmente, sobre as características geométricas, de operação e de aplicação dos cabeçotes baseados em roscas já desenvolvidos e utilizados no âmbito da MAE nos últimos vinte anos. Contudo alguns temas importantes não foram explorados, tais como: uma análise das estratégias de modelagem termomecânica do material durante a extrusão por rosca miniaturizada; b) uma avaliação dos sistemas de monitoramento; e c) uma investigação dos técnicas de controle empregadas no processo.

Nesse contexto, este trabalho tem como objetivo realizar uma Revisão Bibliográfica Sistemática (RBS) sobre as técnicas de extrusão baseada em rosca aplicadas à MAE com ênfase nas áreas de materiais processados, modelagem, monitoramento e controle. Além disso, a RBS desenvolvida analisou as principais áreas de aplicação da tecnologia de Manufatura Aditiva por Extrusão baseada em Rosca (MAER) para o processamento de matérias-primas particuladas. A elaboração de uma RBS é importante~~,~~ para analisar em que estágio de desenvolvimento os estudos estão e é fundamental para determinar as lacunas científicas da área MAER. Para isso, um método de pesquisa e de avaliação de estudos foi aplicado conforme explicado no tópico a seguir.

# Método de Pesquisa

A metodologia para o desenvolvimento da presente revisão foi baseada, principalmente, nos estudos de Siddaway et al. (2018) [18], Torres-Carrión et al. (2018) [19], Justino Netto et al. (2021) [12], e Silva, Cruz e Silveira (2021) [20]. A Tab. 1 apresenta os termos utilizados na Fig. 1, a qual sintetiza os principais passos a serem considerados em uma RBS no contexto de engenharia.

Tabela 1 - Lista de termos

e siglas

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Termo** | **Sigla** |  |
| Familiarizar-se com o tema | FT |
| Formular a(s) pergunta(s)-chave da pesquisa | PC |
| Determinar e aplicar o método de busca | MB |
| Eliminar artigos duplicados | ED |
| Determinar os requisitos para inclusão e exclusão de artigos | RI E RE |
| Avaliar palavras-chave e resumos dos artigos filtrados | RF |
| Ler completamente os artigos filtrados; | LA |
| Inserir literaturas cruzadas e adicionais | REC e REA |
| Determinar o repertório de análise | RA |
| Determinar tipo de revisão sistemática | TR |
| Analisar criticamente o repositório de análise | AR |
| Verificar se as perguntas-chave foram satisfatoriamente respondidas | VPC | Figura 1: Principais etapas do método de busca. Fonte: Adaptado de Silva, Cruz e Silveira (2021). |
| Fonte: Adaptado de Silva, Cruz e Silveira (2021). | |  |

Conforme visto na Fig. 1, a primeira etapa da RBS foi familiarizar-se com o tema (FT), esta etapa foi fundamental para desenvolver uma visão geral do escopo da revisão, além de ser essencial para formulação dos passos seguintes, como a determinação das perguntas-chave (PC) e o do método de busca (MB). Dessa forma, quanto mais familiarizado com o tema o pesquisador estiver, mais facilmente ele irá realizar a revisão sistemática. No contexto deste estudo, as leituras para familiarizar-se com o tema foram*: Screw Extrusion: Science and Technology* [2] e *Polymers Extrusion* [1]; e os artigos intitulados *Screw-assisted 3D printing with granulated materials:a systematic review* [12]; *Process monitoring for material extrusion additive manufacturing: a state-of-the-art review* [21]; e *Additive Manufacturing of Metallic and Ceramic Components by the Material Extrusion of Highly-Filled Polymers: A Review and Future Perspectives* [17].

A próxima etapa foi a formulação das perguntas-chave. Três ferramentas consolidadas são fortemente utilizadas para guiar a elaboração dessa fase da RBS, especialmente nas ciências médicas e humanas, são elas: a PICO (*Population, Intervention, Comparison and Outcomes*), a PICOS (*Population, Intervention, Comparison and Outcomes Study design*) e a SPIDER (*Sample, Phenomenon of interest, Design, Evaluation, Research type).* A ferramenta~~s~~ PICO é mais apropriada para estudos quantitativos, enquanto a PICOS e SPIDER são bem adaptadas para estudos qualitativos, uma explicação clara sobre cada ferramenta, assim como, o comparativo entre elas podem ser encontrados em [22].

Neste estudo, a ferramenta SPIDER foi escolhida por melhor se adequar ao contexto de projeto de engenharia e ser uma importante aliada para análises com caráter, preponderantemente, qualitativo [20]. O uso da ferramenta SPIDER no contexto de MAER pode ser visto na Tab. 2.

Tabela 2 – Aplicação da ferramenta SPIDER.

|  |  |
| --- | --- |
| **Sigla** | **Aplicação no tema** |
| ***S****ample* | Manufatura aditiva por extrusão à quente baseada em rosca. |
| ***P****henomenon of* ***I****nterest* | Materiais utilizados, modelagem termomecânica, monitoramento e controle*.* |
| ***D****esign* | Modelagem dos sistemas de extrusão miniaturizados; projeto de sistemas de monitoramento; e projeto de sistemas de controle |
| ***E****valuation* | Análises dos campos de aplicação, dos materiais, das técnicas de modelagem e dos sistemas de controle |
| ***R****esearch type* | Pesquisa qualitativa: artigos de pesquisa originais em lingua inglesa. |

Fonte: Autoria Própria.

Como pode ser notado na Tab. 2, o termo *sample* da ferramenta SPIDER está relacionado à população ou à amostra de interesse da pesquisa. O termo *phenomenon of interest* refere-se a determinação da tecnologia, do procedimento ou da ferramenta estudada. O termo *design* refere-se ao tipo de projeto considerado na pesquisa. O termo *evaluation* é utilizado para identificar a avaliação que é feita. O termo *research type* refere-se ao tipo de pesquisa (qualitativa, quantitativa ou ambas). A união dos termos considerados compuseram a base para as perguntas-chave e, por consequência, para as *strings* do método de busca.

A partir da Tab. 2, as perguntas-chave (PC) que essa RBS tem como objetivo responder são: a) Quais principais áreas de aplicação da técnica MAER? b) Quais matérias-primas são processadas? c) Quais são as técnicas de modelagem aplicadas? d) Quais sistemas de monitoramento são empregados? e) Quais sistemas e técnicas de controle foram empregados? e f) Quais principais lacunas científicas nessa área de estudo?

A terceira etapa é a determinação do método de busca (MB), o qual pode ser subdivido em três grupos fundamentais: a) determinação das *strings* de busca a partir da(s) pergunta(s)-chave, b) a determinação do período de buscas e c) a determinação das bases de dados. A determinação dos dois últimos grupos é simples, para o período de busca pode-se considerar acontecimentos-chave para seu início ou pode ser apenas uma janela temporal de análise, enquanto para as bases de dados devem ser consideradas aquelas de relevância no contexto da área de busca, sendo indicado bases de dados mais generalistas, o que torna a busca mais abrangente. Logo, o desafio maior é a determinação da(s) *string*(s), uma vez que devam ter um balanço entre sensibilidade (encontrar tantos artigos quanto possível que podem ser relevantes) e especificidade (garantir que esses artigos sejam realmente relevantes). As *strings* podem ser definidas como o conjunto de termos conectados por operadores (OR e AND) ou laços lógicos que irão guiar a busca dos dados. O método de busca utilizado nesta revisão bibliográfica sistemática foi sintetizado na Tab. 3.

Tabela 3 – Principais parâmetros do método de busca.

|  |  |
| --- | --- |
| **Método de busca** | |
| *Strings* | 1° - (TOPIC :("additive manufacturing" OR "material extrusion additive”) AND (screw) AND (extrusion))  2° - (TOPIC: ("monitoring" OR "modelling" OR "modeling" OR “simuation” OR"control") AND "screw" AND ("additive manufacturing" OR "material extrusion additive")) |
| Base de dados | *Scopus, ScienceDirect, Web of Science e Compendex (Engineering Village)* |
| Período de busca | 2018 a 2022 |

Fonte: Autoria Própria.

Como pode ser visto na Tab. 3, duas *strings* foram aplicadas para busca de artigos. A primeira *string* é adaptada do estudo de Justino Netto (2021) cujo objetivo é a busca por tecnologias de equipamentos baseados em rosca para extrusão no contexto da manufatura aditiva. A segunda *string* foi desenvolvida no intuito de buscar estudos de modelagem, monitoramento e controle nas máquinas aditivas de extrusão por rosca.

As bases de dados consideradas nas buscas (*Science Direct, Web of Science, Scorpus e Compendex- Engeneering Village*) são importantes repositórios de estudos nos campos de engenharia, devido a isso foram escolhidas. A determinação do período de busca tem como objetivo filtrar os avanços mais recentes, dos últimos cinco anos, no campo de conhecimento investigado.

Dado que foram utilizadas mais de uma base de dados, foi necessário realizar a eliminação dos estudos duplicados (ED), feito automaticamente pelo programa de gerenciamento de referências, Mendeley Desktop ® versão 1.19.8. Esta foi a quarta etapa.

A quinta etapa do método de pesquisa é a filtragem dos artigos relevantes por meio da determinação de requisitos exclusivos e/ou inclusivos (RE e RI). A elaboração desses critérios, geralmente, é fortemente relacionada às perguntas-chaves, e os parâmetros de análise, os quais podem variar de pesquisa para pesquisa. Deve-se refletir sobre quais são os objetivos da pesquisa e transformá-los em requisitos técnico científicos. Nesta revisão sistemática, os seguintes critérios de inclusão foram adotados: a) o sistema baseado em rosca aplicado à MAE deve ser responsável por transportar, plastificar e pressurizar o material contra o bico de impressão; b) os estudos devem considerar a extrusão de matérias-primas em grânulos, em pó ou em pellets; c) o sistema de extrusão deve ser à quente.

A partir de RI, fez-se o refino preliminar dos estudos encontrados por meio da leitura dinâmica do resumo e das palavras-chaves, etapa chamada RF. Após esse refino, realizou-se a leitura completa dos artigos (LA) com um olhar crítico verificando quais são os mais relevantes e de maior qualidade para formulação do repositório.

A LA foi fundamental para a prospecção de referências cruzadas (REC), as quais são normalmente citadas em artigos relevantes, porém não foram encontradas pelo método de busca. A união dos artigos relevantes encontrados pelo método de busca com as REC formam o RA. A etapa de análise dos resultados (AR) foi realizada e será apresentada.

# Resultados da Pesquisa

Os resultados da quantidade de artigos filtrados a partir da metodologia descrita no item anterior podem ser observados na Fig.2.

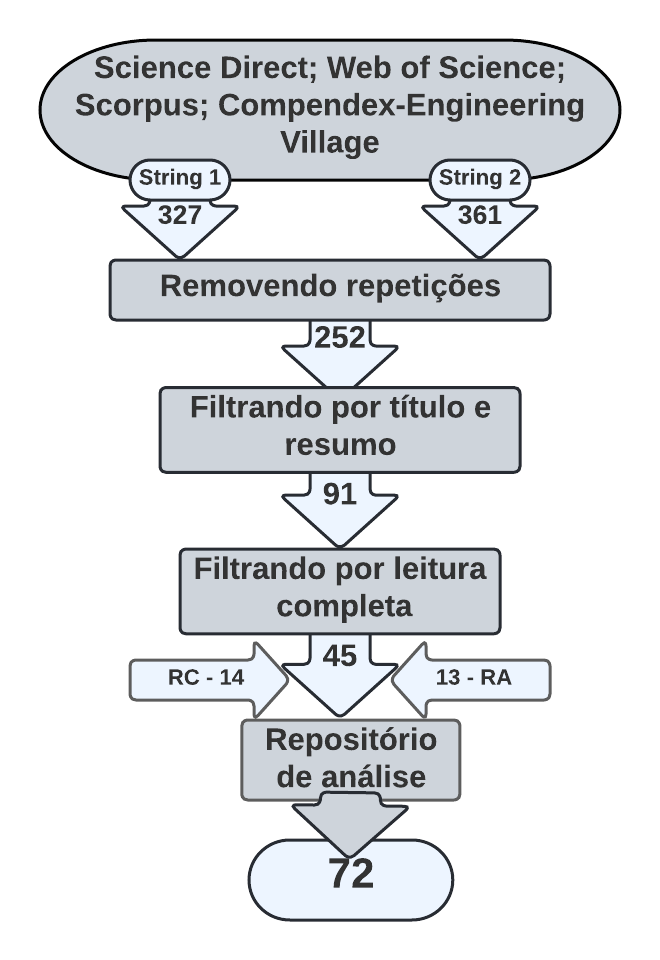


Figura 2 – Etapas para elaboração do RF. Fonte: Elaborada pelos autores (2022)

Como pode ser observado da Fig. 2, foram encontrados, nas quatro bases de dados exploradas, 688 artigos, 327 referentes à string 1 (38 da Science Direct; 125 da Scorpus; 88 da Web of Science; e 76 da Compendex – Engineering Village) e 361 referentes à string 2 (52 da Science Direct; 149 da Scorpus; 92 da Web of Science; e 68 da Compendex – Engineering Village). Contudo, após a remoção das repetições, dado que as bases podem buscar artigos iguais, assim como as *strings*, restaram 252 artigos originais. A filtragem por resumo e título foi realizada a partir dos critérios de inclusão definidos anteriormente, em que 161 artigos foram descartados. Após a leitura completa dos artigos, restaram apenas 45. As referências cruzadas e adicionais foram somadas aos 45 artigos formando o repositório de análise dessa RBS: 72 estudos originais. A evolução do número de publicações nos últimos 5 anos pode ser vista na Fig 3.

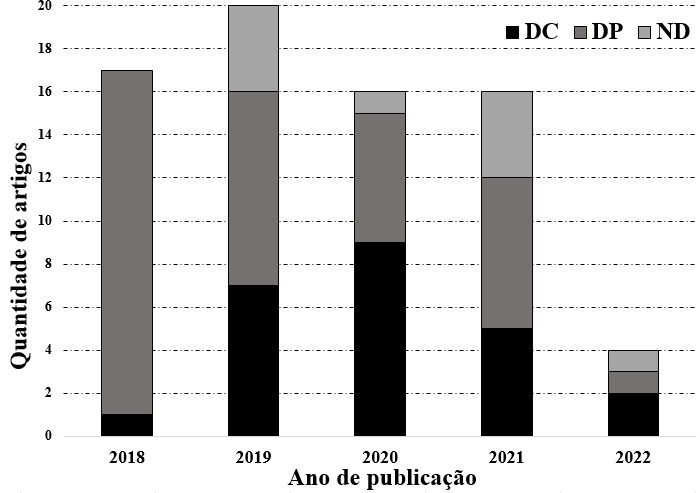


Figura 3 – Evolução da quantidade de artigo nos últimos cinco anos. Fonte: Elaborada pelos autores (2022)

A aplicação da tecnologia de MAER acontece por meio de dispositivos acadêmicos do tipo protótipo funcional (DP) e de dispositivos comerciais (DC), customizados ou não. Alguns artigos que não determinam os equipamentos utilizados foram identificados como ND na Fig. 3.

Conforme visto na Fig. 3, pode-se observar um aumento no uso de equipamentos comerciais, a partir do ano de 2019. Contudo, somando-se o uso ao longo dos cinco anos analisados, 39 estudos utilizaram equipamentos do tipo protótipos funcionais, enquanto apenas 24 utilizaram equipamentos comerciais. A sobreposição do uso de protótipos acadêmicos funcionais está fortemente associada à habilidade de personalização da máquina de acordo com a características do material processado e do produto fabricado, dando maior flexibilidade aos estudos realizados. Por outro lado, é importante destacar que os equipamentos comerciais possuem a vantagem da praticidade de uso sem a necessidade de um projeto preliminar.

O campo de aplicação de cabeçotes aplicados MAER está fortemente associado ao uso de materiais que possuam limitações para o processamento em forma de filamento, assim como em processos em que taxa de deposição do material precise ser maior. Para os 72 artigos analisados, os campos de aplicação mais relevantes foram apresentados na Fig. 4

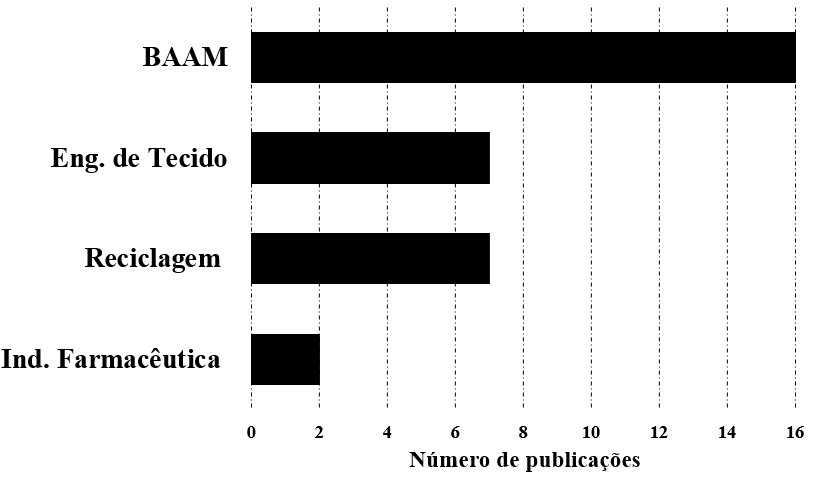


Figura 4 – Quantidade de artigo de acordo com o campo de aplicação: Elaborada pelos autores (2022)

Na Fig. 4, a sigla BAAM refere-se ao termo em inglês *Big Area Additive Manufacturing*, o qual é um segmento da MAE com foco no processamento de materiais em larga-escala. O destaque desse campo de aplicação no contexto da MAER está fortemente associado à capacidade de altas taxas de deposição deste tecnologia de processamento. Os artigos publicados nessa área BAAM abordam o desenvolvimento de equipamentos em grande porte [23]; a modelagem termomecânica do processo [24, 28]; a avaliação da qualidade de impressão [25, 26, 27, 41]; a identificação dos principais desafios associadas a impressão em larga escala [29, 30]; o monitoramento *in line* do perfil de pressão ao longo do cabeçote baseado em rosca [31]; a comparação entre as técnicas FFF e FGF (*Fused Granular Fabrication*) [32]; o controle online dos parâmetros de impressão durante o processo [33]; e a caracterização mecânica [34, 35], reológica [36] e termomecânica dos materiais [37].

Os dois seguintes campos de aplicação MAER são a Engenharia (Eng.) de Tecido e a Reciclagem de Materiais, como pode ser notado na Fig 4. No primeiro grupo, os estudos publicados abordam o desenvolvimento de estruturas tridimensionais, porosas e temporárias capazes de suportar o crescimento de um tecido corporal, denominadas *scaffolds*. O uso de técnicas aditivas para o desenvolvimento de *scaffolds* têm sido especialmente vantajosas por permitirem um maior controle sobre a geometria da estrutura e sobre a distribuição da porosidade na mesma. No segundo grupo, os estudos publicados abordam especialmente a extrusão monorosca de materiais reciclados granulares, evitando a necessidade de reprocessá-los para matérias-primas filamentosas, exigência da técnica FFF.

Os artigos que abordam aplicações MAER de materiais granulares no contexto da Eng. de tecidos exploram an concepção de equipamentos com cabeçotes monorosca convencional [16], com cabeçotes múltiplos (um baseado em rosca e dois baseados em seringa) para a fabricação de *scaffolds* com múltiplos materiais [38, 39], com cabeçote híbridos (MAER associada a eletrofiação rotativa) [40], e cabeçotes monorosca associado à mesa rotativa para o desenvolvimento de *scaffolds* cardiovasculares com módulo de Poisson zero [41]. Além disso, estudos avaliam experimentos sobre as propriedades mecânicas das *scaffolds* desenvolvidas [42, 43], e experimentos de validação funcional biológica para verificação da eficiência de alocação, crescimento e multiplicação celular nas estruturas foram explorados [40].

As técnicas de MAER de materiais granulares no contexto da Reciclagem de Materiais são especialmente vantajosas por eliminar etapas de processamento termomecânico associada a produção do filamento. Os artigos publicados apresentam estudos com duas principais abordagens, a caracterização de propriedades térmicas e mecânicas dos materiais processados [44, 45, 46, 47] e a comparação da qualidade de impressão entre as técnicas FFF e FGF [44, 48, 49]. As propriedades mecânicas das peças fabricadas de materiais reciclados do tipo PLA (poliácido láctico), PP (Polipropileno), PET (Politereftalato de etileno), ABS (Acrilonitrila butadieno estireno) apresentaram limite de resistência à ruptura menor do que os materiais virgens, e compatíveis com materiais reciclados comerciais [49]. Além disso, tanto em [44] quanto em [49], as propriedades mecânicas e a qualidade de impressão das peças fabricadas por FFF e por FGF mantiveram-se compatíveis, contudo é fundamental destacar que as geometrias avaliadas eram pouco complexas.

Os estudos de MAER no contexto da indústria farmacêutica são promissores devido à possibilidade de se produzir medicamentos personalizados, ou seja, corretamente formulados a partir das demandas do usuário. Os comprimidos podem ser fabricados por meio de cabeçotes tipo seringas ou até cabeçotes baseados em rosca a partir de materiais em géis, semi-sólidos ou sólidos. Nesta RBS, foram considerados em estudos da MAER a partir de partículas sólidas. Nesse contexto, dois trabalhos foram filtrados pelo método de busca. [50] destacam que comprimidos com itraconazola produzidos por impressão 3D apresentaram características físicas e mecânicas adequadas para a aplicação proposta, e não apresentaram degradação alguma do fármaco após o processamento. [51] compararam compridos impressos na técnica FGF e FFF e afirmaram que nem todas as configurações de porcentagem de drogas poderam ser impressas por meio da FFF, dado a necessidade de torná-las filamentosas. Eles concluíram que nesta área de estudo a técnica FGF é mais promissora pois permite maior possibilidade de personalização dos medicamentos.

A Tab. 4 apresenta os materiais processados nas áreas de aplicação do uso da tecnologia da MAER de matérias primas granulares, pellets ou pó, conforme os campos apresentados na Fig. 4 Analisando a Tab. 4 é possível notar a tendência do uso de reforços de fibra de carbono e de vidro com elementos promissores para melhoria das propriedades mecânicas dos produtos impressos por meio de materiais termoplásticos como o ABS, PLA, PES, PPS, PP. Além disso, é possível notar o uso preponderante de s*caffolds* à base de PCL. No campo de aplicação da reciclagem, os materiais mais abordados são os próprios materiais mais utilizados para produção de filamentos aplicados a tecnologia FFF (ABS, PLA, PET, PC). Na indústria farmacêutica, medicamento à com ativos de itranconazola e de tartarato metoprolol foram explorados. O uso da tecnologia MAER é uma importante aliada quando existe a necessidade de aquecimento e da homogeneização dos medicamentos. Contudo, nenhum dos artigos analisados avaliaram a qualidade da mistura entre as matérias primas investigadas.

Dos 72 artigos filtrados, 32 deles apresentaram de forma clara o campo de aplicação da tecnologia de MAER para o processamento de materiais granulares. As principais informações associadas aos outros estudos podem ser consultadas em [54].

## Modelagem termomecânica dos cabeçote baseados em rosca

Dos 72 artigos filtrados, apenas 10 apresentaram a modelagem térmica ou termomecânica dos materiais processados no cabeçote baseado em rosca, conforme

apresentado na Tab. 5.

Tabela 4 – Lista de materiais utilizados em cada campo de aplicação

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Autores** | | **Material** | |
| **BAAM** | [36] | | Compósito [ABS (Acrilonitrila butadieno estireno); PPSU(polifenilsulfona); PES(Polisulfona); PPS(Poli sulfeto de p-fenileno)] + Fibra de Carbono ( 20% wt - 40% wt) |
| [37] | | Compósito [ABS (Acrilonitrila butadieno estireno)] + [(Fibra de carbono curta (50 - 500 um; 20%wt) ou Fibra de vidro curta (50 - 500 um; 20 % wt) ] |
| [31] | | Compósito [ABS (Acrilonitrila butadieno estireno)] + Fibra de carbono (20%wt) |
| [25] | | Compósito [PP (Polipropileno)] + Fibra de carbono (30%wt) |
| [26] | | Compósito [ABS (Acrilonitrila butadieno estireno)] + Fibra de carbono (20%wt) |
| [23] | | Compósito [ [ABS (Acrilonitrila butadieno estireno)] + [(Fibra de carbono curta (5%wt) ou Fibra de vidro curta (5 % wt) ] |
| [32] | | TPU (Termoplástico poliuretano) |
| [24] | | ND |
| [29] | | PLA (poliácido láctico) e ABS (Acrilonitrila butadieno estireno) |
| [34] | | Compósito [ABS (Acrilonitrila butadieno estireno)] + Fibra de carbono contínua |
| [29] | | Compósito [ [ABS (Acrilonitrila butadieno estireno)] + Fibra de carbono (ND %wt) |
| [52] | | Compósito [ [ABS (Acrilonitrila butadieno estireno)] + Fibra de carbono (13 %wt) |
| [30] | | Compósito [ [ABS (Acrilonitrila butadieno estireno)] + Fibra de carbono (13 %wt) |
| [40] | | ND |
| [35] | | Compósito [ [PPS (Poli sulfeto de p-fenileno)] + Fibra de carbono (50%wt) |
| [33] | | ND |
| **Eng..de Tecidos** | [40] | | PCL [Policaprolactona]; PLR [(5-HIDROXI-4,6-DIMETILPIRIDIN-3-IL)METILDIIDROGÊNIO FOSFATO]; PL1000 [ oligo [ 2-hydroxy-2-methyl-1-[ 4-(1-methylvinyl) phenyl] propanone] and 2-Hydroxy-2-methyl-1-phenyl-1-propanone]; e PHR[poli(hidroxiuretano)] |
| [38] | | PCL [Policaprolactona] + Carbono Nanotubos (1 - 5 %wt) |
| [39] | | PCL [Policaprolactona] |
| [42] | | PCL [Policaprolactona] |
| [16] | | PEEK - (Poli(éter-éter-cetona) |
| [43] | | Compósito [PCL (Policaprolactona) + Micropartículas de seda] |
| [41] | | Compósito [PCL (Policaprolactona) + Micropartículas de seda] |
| **Reciclagem** | [44] | | PLA (poliácido láctico) e PLA (poliácido láctico) reciclado |
| [45] | | Material recicladodo de limpador de para-brisa |
| [46] | | ND |
| [47] | | PET (Politereftalato de etileno) reciclado |
| [48] | | PC (policarbonato) reciclado |
| [53]) | | ABS (Acrilonitrila butadieno estireno) reciclado |
| [49] | | PLA (Policaprolactona) ABS (Acrilonitrila butadieno estireno) PET (Politereftalato de etileno)e PP (polipropileno) reciclados |
| **Ind. Farmacêutica** | [50] | | Itraconazole + HPC |
| [51] | | EVA (Ethylene-vinyl acetate) (9 %VA, 12 %VA, 16 %VA, 18 %VA, 25 %VA, 28 %VA, e 40 %VA) + MPT (metoprolol tartrate - 50 %wt) |

Fonte: Autoria Própria

Tabela 5 – Modelagem termomecânica no contexto da MAER

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **Autores** | **Região** | **Modelagem do material** | **Características da modelagem** | **Objetivo do Modelo** |
| [55] | ZD e BI | ND | Modelagem numérica 3D (Solidworks® Thermal Analysis) | Verificação do perfil de temperatura ao longo da zona de dosagem e do bico de impressão |
| [56] | ZA, ZC, ZD E BI | ND | Modelagem numérica 3D (ANSYS® Workbench 17) | Verificação do perfil de temperatura ao longo do cabeçote monorosca |
| [31] | ZA, ZC, ZD E BI | Fluido Newtoniano Viscoso | Modelagem 1D analítica isotérmica | Verificação do perfil de pressão ao longo do cabeçote, assim como a caracterização da curva de vazão |
| [57] | ZD e BI | ND | Modelagem numérica 3D (ANSYS® Workbench ND) | Verificação do perfil de temperatura ao longo da zona de dosagem e do bico de impressão |
| [53] | ZA, ZC, ZD E BI | Fluido Newtoniano Viscoso | Modelagem analítica 1D Isotérmica | Verificação da vazão, da potência e do torque requerido |
| [58] | MD | Fluido não newtoniano viscoso | Modelagem analítica 1D isotérmica | Desenvolvimento de um modelo de deposição semi empírico para impressão do PLA e ABS |
| [59] | ZA, ZC, ZD | Fluito Não newtoniano viscoso (cross WLF) | Modelagem numérica 3D (ND) | Investigação da capacidade do índice de mistura e do taxa de cisalhamento local |
| [52] | ZD e BI | Fluido não newtoniano viscoelástico | Modelagem Numérica 3D utilizando o software Ansys Polyflow ND | Investigação do efeito do movimento rotativo da rosca e das características do escoamento na orientação da fibras do material |
| [60] | ZD e BI | Fluido Newtoniano Viscoso | Modelagem Numérica 3D Ansys R.19.0 (Considera o calor gerado devido ao aquecimento viscoso do ABS) | Verificação do Perfil de temperatura ao longo da zona de dosagem e do bico de impressão |
| [61] | ZC e ZD | Fluido não newtoniano viscoso ( cross WLF) | Modelagem Numérica 1D não isotérmica no software Matlab® | Verificação da eficiencia de fusão ao longo das zonas de compressão e dosagem para diferentes parâmetros de impressão |
| [62] | ZC e ZD | Fluido não newtoniano viscoso (cross WLF) | Modelagem Numérica 1D não isotérmica no software Matlab® | Validação experimental do modelo termomecânico |

\*BI (Bico de Impressão), ZA (Zona de Alimentação), ZC (Zona de Compressão) e ZD (Zona de dosagem)

Fonte: Autoria Própria

Observando a Tab 5, pode observar que há diferentes abordagens de modelagens térmicas e termomecânicas do cabeçote baseado em rosca para MAER à quente. [55], [56], [57] e [60] desenvolveram estudos para verificação do perfil de temperatura com objetivo de caracterizar o fluxo de calor nas diferentes zonas do cabeçote monorosca. Todos utilizaram ferramentas comerciais numéricas para modelagem do fluxo de calor, contudo não realizam a modelagem termomecânica da matéria-prima nas regiões de transporte, compressão e plastificação ao longo do conjunto rosca-barril. Dessa forma, não consideram a parcela de calor gerada pelo aquecimento viscoso decorrente da interação entre o termoplástico, especialmente com a rosca em movimento rotativo.

A modelagem termomecânica do material durante o escoamento ao longo do cabeçote é importante para a estimativa do perfil de pressão ao longo da rosca [31], permitindo um correto dimensionamento do torque requerido durante a extrusão do material [53], além de ser essencial para verificar a eficiência da plastificação ao longo da zonas de compressão e dosagem [61, 62]. Nesse contexto, Gala et al (2020) [61] desenvolveram um modelo termomecânico estacionário e não-isotérmico~~s~~, no qual o material foi modelado conforme o modelo de viscosidade *cross* WLF (Williams–Landel–Ferry), para investigar a influência dos parâmetros de processo (velocidade de rotação, temperatura e vazão) na plastificação do ABS ao longo da rosca. Além disso, eles realizaram a validação experimental do modelo, concluindo que esse processo pode ser um importante aliado para o desenvolvimento de sistemas de controle online.

Rastrear a região em que a plastificação se inicia é uma forte aliada para evitar a degradação do polímero ao longo da rosca. Em cabeçotes miniaturizados, este tipo de investigação é pouco abordada, mas fundamental para auxiliar em modelos de predição de qualidade de impressão, tal qual o modelo semi-empírico desenvolvido por Schmidt et al (2019) [58]. Apesar do modelo desenvolvido por Schmidt et al (2019) [58] ser capaz de prever variações geométricas no fio depositado em razão das características do processo e do material, existe a necessidade de se rastrear experimentalmente os problemas para cada material analisado e, em seguida, determinar as constantes empíricas que relacionam o modelo teórico com o desvios geométricos do filamento.

Outro estudo que deve ser destacado foi o realizado por Wang et al (2019) [52], neste artigo simulações numéricas no software Ansys Polyflow® foram desenvolvidas para verificação da influência dos parâmetros de processo na orientação de fibras que carregam termoplásticos. O sistema~~s~~ foi modelado como isotérmico e o material foi modelado como viscoeslastico a partir do modelo *Phan-Thien-Tanner*.

O índice de mistura de uma extrusora monorosca para MA foi avaliada em Tey et al. (2019) [59] por meio de uma modelagem numérica. Contudo poucas informações foram apresentadas sobre o *software* de modelagem utilizado~~s~~ e sobre as condições de contorno consideradas. Nesse trabalho, diferentes configurações geométricas de uma rosca convencional foram avaliadas para verificar qual seria mais a eficiente. O índice de mistura máximo atingido foi de 0.5.

A validação do modelo analítico ou numérico precisa ser feita com dados experimentais. Nesse contexto, as informações de monitoramento são uma importante aliada. Além disso, a modelagem numérica associada ao monitoramento adequado são fortes aliados para o desenvolvimento de sistemas de controle eficiente e de técnicas de predição de características geométricas, e mecânicas da parte fabricada.

## Sistemas de monitoramento e controle em MAER de matérias-primas granulares ou em pó

Dos 72 artigos analisados, 26 apresentaram alguma informação acerca do monitoramento e do controle utilizado no sistema de impressão 3D por meio de um cabeçote baseado em rosca. Os principais artigos que abordaram informações de monitoramento e de controle foram organizados na Tab.6.

Observando a Tab. 6, nota-se que sensores mais frequentemente utilizados são os sensores de temperatura, os quais são especialmente alocados na ZD e no BI. Isso se deve ao fato de a temperatura do extrudado influenciar de diferentes formas a qualidade da parte fabricada, como na adesão entre camadas, na precisão dimensional e nos vazios da peça. Sem dúvidas, é fundamental monitorar a temperatura no BI, contudo quando se trata de um sistema baseado em rosca, o monitoramento de temperatura na zona de compressão e na zona de alimentação são importantes para estimar a região de plastificação, evitar a degradação e permitir que a alimentação do material na ZA seja realizada sem a aglomeração por fusão precoce do material. Whyman *et al*. (2018) [68] desenvolveram um sistema de controle de temperatura em malha fechada tipo PID. Neste estudo, uma técnica de refrigeração por meio do transporte de fluido refrigerante foi validada. O sistema de controle de temperatura se mostrou eficiente e contribuiu para melhorar o transporte no material na zona de alimentação.

Tabela 6 – Lista de sensores e sistemas de controle aplicados à MAER

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Autores** | **Região do cabeçote** | **Sensores no cabeçote** | **Controle de temperatura/Controle de movimentação dos eixos/Controle da rotação da rosca** |
| [44] | ZD | Termistor (ND) | Marlin Firmware (PID)/Marlin Firmware/Marlin Firmware |
| [55] | ZD | Termistor (ND) | ND |
| [56] | ZA, ZC E ZD | Temopar (Tipo J) | ND |
| [60] | ZD | Termistor (ND) | Controle Bang-bang/Marlin Firmware/Marlin Firmware |
| [31] | ZD E BI | Transdutor combinado de pressão e de temperatura (TPT4634-5M-3/18-SIL2 )  1243) | ND |
| [63] | ZD | Termistor (100k EPCOS B57550G1104F) | ND/Marlin Firmware/ND |
| [57] | BI | Termopar (tipo K) | Contorlador PID (ND) /ND/Controlador PWM (ND) |
| [25] | ND | ND | ND/Controlador KRC 2/ND |
| [64] | ZD | Termopar (tipo K) e Escaner optico (ATOS) | Controlador de temperatura (ND) /Controlador de fresamento CNC (ND)/Controlador de fresamento CNC (ND) |
| [38] | ND [38] | ND | CNC drives (ND) |
| [39] | ZD | Termopares OMEGA (ND) | Controlador digital PID (ND)/Controlador Geo Brick LV/ Controlador Geo Brick LV |
| [42] | ZD | Termopares OMEGA (ND) | Controlador digital PID (ND)/Controlador Geo Brick LV/ Controlador Geo Brick LV |
| [27] | ZA, ZC E ZD | Sensor de temperatura (ND)e Sensor de posição (Omron laser triangulation sensor) | Conotrolador comercial (ND)/ Controlador robótico (ND)+ Controle discreto de deposição online /Controlador comercial (ND) |
| [48] | ND | ND | Marlin Firmware (PID)/Marlin Firmware/Marlin Firmware |
| [51] | ND | ND | Duet 2 WIFI controller(ND)/Duet 2 WIFI controller(ND)/Duet 2 WIFI controller(ND) |
| [58] | ZD E BI | Sensor de temperatura (P100) | ND/Controle da Fanuc LR Mate 200iB/ND |
| [65] | BI | Termopar (tipo K) | ND/Controlador (Xylotex XS-3525/8S-4 )/ND |
| [66] | ZA, ZC E ZD | Sensor de temperatura (ND) | ND/ Controlador CNC (Modell M3-3D of BZT)/ND (Modell M3-3D of BZT MaschinenbauGmbH). Movimentação |

Fonte: Autoria Própria

Tabela 6 – Lista de sensores e sistemas de controle aplicados à MAER (continuação)

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Autores** | **Região do cabeçote** | **Sensores no cabeçote** | **Controle de temperatura/Controle de movimentação dos eixos/Controle da rotação da rosca** |
| Tey et al. (2019) [59] | ZA, ZC E ZD | Sensores de temperatura (ND) | ND/Controlador PLC (ND)/Controlador PLC (ND. |
| Thakur et al. (2021) [34] | BI | ND | ND/Controlador (Galaxy G, Automated Precision Inc.)/ND |
| Tian et al. (2021) [67] | ZD | Sensor combinado de pressão e temperatura (Wuxi Cienno Measurement & Control Technology) | ND |
| Tseng etal.(2018) [16] | ZA, ZC E ZD | Sensor de temperatura (ND) | Controlador PID de temperatura(ND)/ Controlador (OPM M-JTH200-100-C7 e PCI-7244-National Instruments)/ND |
| Wang et al. (2021)[41] | ND | ND | ND/Controlador (PMAC -OMRON’s Delta Tau Data Systems)/ND |
| Whyman et al. (2018)[68] | ZA, ZC E ZD | Sensores de temperatura (ND) | Controlador PID (Watlow EZ-ZONE PID)/ Controle Marlin Firmware/ND |
| Woern et al. (2018) [49] | ZC E ZD | Sensores de temperatura (ND) | Marlin Firmware /Marlin Firmware/ND |
| Xiang et al. (2021) [33] | ND | ND | Marlin Firmware/Controlador (CLIK)/Marlin Firmware |

Fonte: Autoria Própria

Observando a Tab. 6, também é possível notar o uso de transdutores de pressão no BI [31] ou ZD [67]. O uso desses dispositivos são especialmente interessantes por serem um importante indicativo do ambiente termomecânico no qual o material está fluindo, além de serem fundamentais para prevenir avarias em componentes mecânicos como acoplamentos e o eixos do motores de rotação. O principal desafio do uso dos transdutores de pressão está associado ao fato de serem transdutores invasivos, que devem estar em contato direto com o fluido em escoamento, isso limita de forma mais intensa aplicações em sistemas miniaturizados devido a necessidade de transdutores de pequenas dimensões e resistentes a altas temperaturas. O monitoramento de pressão do bico tem sido pouco explorado, apesar de ser uma grandeza fundamental para validação de modelos e simulações computacionais do processo de extrusão na rosca.

Outros trabalhos abordaram o monitoramento de posição das camadas por meio de técnicas de escaneamento online [25] e o uso de sensores de posição, como Rebaioli *et al*. (2019) [27] desenvolveram um sistema de controle online para realizar alterações de fatiamento em tempo real a partir das informações de sensores de posição que verificavam distância entre as camadas e comparava o real com o esperado. O sistema se mostrou eficaz para melhorar a qualidade geométrica da peça e possui uma resposta ágil de refatiamento para o controle online.

# Lacunas científicas

As principais lacunas cientificas na área da MAER identificadas nesse estudo foram:

* Dentre os 72 artigos filtrados e analisados não se identificou nenhum cabeçote de impressão 3D por rosca com seção de mistura, e somente um trabalho avaliou a qualidade da mistura de rosca simples, apesar de ser frequentemente utilizada para o processamento de materiais compostos ou compósitos. Investigações sobre a qualidade da mistura, assim como o desenvolvimento de rosca modulares seriam importante aliados para melhoria da qualidade da mistura dispersiva e distributivas em materiais poliméricos carregados;
* A modelagem termomecânica global dos sistemas baseados em rosca para manufatura aditiva ainda não foi explorada. Esta abordagem é especialmente importante para o desenvolvimento de modelos de previsão da qualidade do extrudado, o que já tem sido frequentemente explorado na tecnologia FFF, contudo pouco analisado na MAER;
* Os sistemas de instrumentação e monitoramento são normalmente adaptados da tecnologia FFF e, majoritariamente, baseados em sensores não invasivos.
* O desenvolvimento de sistemas de instrumentação mais robustos capazes de monitorar a temperatura e a pressão nas diferentes regiões da rosca seriam fundamentais para o correta distribuição de temperatura ao longo do barril;
* Os sistemas de controle *on line* foram pouco explorados e não foram integrados com modelos matemáticos para previsão da qualidade superficial ou dimensional;

# Conclusões

Analisando os resultados da Revisão Bibliográfica Sistemática, foi possível concluir que as perguntas-chaves formuladas nesta RBS foram satisfatoriamente respondidas, desse modo as principais áreas de aplicação da tecnologia de MAER, os principais materiais processados; as principais técnicas de simulação e modelagem; as características fundamentais dos sistemas de monitoramento e de controle da MAER foram sintetizados e discutidos. Além disso, lacunas científicas foram identificadas e apresentadas com intuito de guiar explorações de pesquisas futuras nesta área de estudo.

# Referências

[1] C. Rauwendaal. “Polymer Extrusion”. Munich: Carl Hanser Verlag, 2014

[2] J.L White; H. Potente. “Screw Extrusion”. Munich: Hanser Publishers, 2003.

[3] H.S.Podyman et al. Modeling the Homogenization Process of Polyethylene Compositions in a Single-Screw Extruder with a Maddock Mixing Element. Mech Compos Mater 57, 517–526, 2021. https://doi.org/10.1007/s11029-021-09974-x

[4] V. Pandey, J. M. Maia. Comparative computational analysis of dispersive mixing in extension-dominated mixers for single-screw extruder. Polymers Science and Engineering , 60, 2390-2402, 2020. https://doi.org/10.1002/pen.25478

[5] P. Cassagnau, V. Bounor-Legaré, B. Vergnes, Experimental and modelling aspects of the reactive extrusion process, Mechanics & Industry 20, 803, 2019. https://doi.org/10.1051/meca/2019052

[6] B.Arora et al. Reactive extrusion: A review of the physicochemical changes in food systems,

Innovative Food Science & Emerging Technologies, Volume 64,2020. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102429.

[7] M.Ohara et al. Experimental and Numerical Simulation Study of Devolatilization in a Self-Wiping Corotating Parallel Twin-Screw Extruder. Polymers 2020, 12, 2728. https://doi.org/10.3390/polym12112728

[8] C. Marschik et al. Modeling devolatilization in single- and multi-screw extruders", AIP Conference Proceedings 1914, 080006 (2017) https://doi.org/10.1063/1.5016746

[9] L. Val Siqueira et al.Starch-based biodegradable plastics: methods of production, challenges and future perspectives, Current Opinion in Food Science, Volume 38, 122-130, 2021, https://doi.org/10.1016/j.cofs.2020.10.020.

[10] S. Choton et al.Extrusion technology and its application in food processing: A review. Pharma Innovation 2020;9(2):162-168. DOI: 10.22271/tpi.2020.v9.i2d.4367

[11] S. Simoões et al, Hot-melt extrusion in the pharmaceutical industry: toward filing a new drug application, Drug Discovery Today, Volume 24, Issue 9, 2019. https://doi.org/10.1016/j.drudis.2019.05.013.

[12] J.M. Justino Netto et al. Screw-assisted 3D printing with granulated materials: a systematic review. “Int J Adv Manuf Technol” 115, 2711–2727, 2021. https://doi.org/10.1007/s00170-021-07365-z

[13] Z.C. Silveira et al. Design development and functional validation of an interchangeable head based on mini screw extrusion applied in an experimental desktop 3-D printer, “Int. J. Rapid Manufacturing”, v. 4, n. 1, pp. 49–65, 2014. DOI:10.1504/IJRAPIDM.2014.062037

[14] J.L. Dávila et al. Fabrication of PCL/β-TCP scaffolds by 3D mini-screw extrusion printing. “Journal of Applied Polymer Science”, v. 133, n. 15, p. 1-9, 2015. https://doi.org/10.1002/app.43031

[15] Z. Zhou et al. Additive manufacturing of heat-sensitive polymer melt using a pellet-fed material extrusion. Additive Manufacturing, v. 24, p. 552-559, 2018. https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.10.040

[16] J. W. Tseng et al. Screw extrusion-based additive manufacturing of PEEK. Materials & Design, 140, 209–221, 2018. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.11.032

[17] J. G. Gutierrez, et al. Additive manufacturing of metallic and ceramic components by the material extrusion of highly-filled polymers: a review and future perspectives. Materials 11(5):840, 2018. https://doi.org/10.3390/ma11050840

[18] A. P. Siddaway, et al. How to do a systematic review: a best practice guide for conducting and reporting narrative reviews, meta-analyses, and meta-syntheses. Annu Ver Psychol 2018: 70(1):747–770. https://doi.org/10.1146/annurev-psych-010418-102803

[19] Torres-Carrión et al. Methodology for Systematic Literature Review applied to Engineering and Education. Santa Cruz de Tenerife, Canary Islands, Spain: IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON). 17-20 April, 2018: 1365 – 1373.

[20] D.M.L. Silva; L.M. Cruz; Z.C. Silveira. Revisão Sistemática: Conceitos e Importância em Pesquisas de Inovação, 2021. [PDF]. Disponível em: http://soac.eesc.usp.br/index.php/SiPGEM/vsipgem/paper/view/3179/2213

[21] A. Oleff et al. Process monitoring for material extrusion additive manufacturing: a state-of-the-art review. Prog Addit Manuf 6, 705–730, 2021. https://doi.org/10.1007/s40964-021-00192-4

[22] MA Methley et al. PICO, PICOS and SPIDER: a comparison study of specificity and sensitivity in three search tools for qualitative systematic reviews. BMC Health Services Research, 2014. 14:579. doi:10.1186/s12913-014-0579-0

[23] D. Moreno Nieto et al. Large-format polymeric pellet-based additive manufacturing for the naval industry. Additive Manufacturing, 23(July), 2018. 79–85. https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.07.012

[24] A. Pricci, et al. Analytical and numerical models of thermoplastics: A review aimed to pellet extrusion-based additive manufacturing. Polymers, 2021.13(18). http://dx.doi.org/10.3390/polym13183160

[25] M. Krcma et al. Comparison of the effects of multiaxis printing strategies on large-scale 3D printed surface quality, accuracy, and strength. International Journal Of Advanced Manufacturing Technology, 119(11–12), 7109–7120 2021. https://doi.org/10.1007/s00170-022-08685-4

[26] E. Meraz Trejo et al. Compressive deformation analysis of large area pellet-fed material extrusion 3D printed parts in relation to in situ thermal imaging. Additive Manufacturing, 33(May 2019), 101099, 2020. https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101099

[27] L. Rebaioli et al.. Process parameters tuning and online re-slicing for robotized additive manufacturing of big plastic objects. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 55, 55–64, 2019. http://dx.doi.org/10.1016/j.rcim.2018.07.012

[28] Z. Wang, Z.& D. E. Smith, (2019). Numerical analysis of screw swirling effects on fiber orientation in large area additive manufacturing polymer composite deposition. Composites Part B: Engineering, 177, 2019.

[29] A. Roschli et al. Designing for Big Area Additive Manufacturing. Additive Manufacturing, 25(September 2018), 275–285, 2019. https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.11.006

[30] Z. Wang et al. A framework for large scale fused pellet modeling (FPM) by an industry robot. Proceedings - 26th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium - An Additive Manufacturing Conference, 2020 SFF 2015, 411–421

[31] J. Dvorak et al. Measurement and analysis of pressure profile within big area additive manufacturing single screw extruder. Solid Freeform Fabrication 2019: Proceedings of the 30th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium - An Additive Manufacturing Conference, SFF 2019, 1242–1250

[32] E. Oelsch et al. Comparative investigation on the mechanical behavior of injection molded and 3D-printed thermoplastic polyurethane. Journal Of Rubber Research, 24(2, SI), 249–256, 2021. https://doi.org/10.1007/s42464-021-00092-w

[33] Y Xiang et al.. Trajectory Control and Simulation of 6-DOF Robotic System Based on Screw Theory. IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference), 2021-Octob. https://doi.org/10.1109/IECON48115.2021.9589141

[34] A. Thakur et al. Large-scale additive manufacturing of high strength fiber-reinforced polymer composites. International SAMPE Technical Conference, 2021-June, 1312–1322.

[35] P.Yeole et al. Mechanical Characterization of High-Temperature Carbon Fiber-Polyphenylene Sulfide Composites for Large Area Extrusion Deposition Additive Manufacturing. Additive Manufacturing, 2020 34. http://dx.doi.org/10.1016/j.addma.2020.101255

[36] C.Ajinjeru et a. Rheological survey of carbon fiber-reinforced high-temperature thermoplastics for big area additive manufacturing tooling applications. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 34(11), 1443–1461, 2021. https://doi.org/10.1177/0892705719873941

[37] K. M. M, Billah et al. Thermomechanical characterization of short carbon fiber and short glass fiber-reinforced ABS used in large format additive manufacturing. Additive Manufacturing, 35(April), 2021, 101299. https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101299

[38] F Liu et al. A plasma-assisted bioextrusion system for tissue engineering. CIRP Annals, 67(1), 229–232, 2018. https://doi.org/10.1016/j.cirp.2018.04.077

[39] F Liu et al. User interface tool for a novel plasma-assisted bio-additive extrusion system. Rapid Prototyping Journal, 24(2), 368–378, 2018. http://dx.doi.org/10.1108/RPJ-07-2016-0115

[40] B.Huang et al. Engineered dual-scale poly (-caprolactone) scaffolds using 3D printing and rotational electrospinning for bone tissue regeneration. Additive Manufacturing, 36, 2020. http://dx.doi.org/10.1016/j.addma.2020.101452

[40] B.Huang et al. Aligned multi-walled carbon nanotubes with nanohydroxyapatite in a 3D printed polycaprolactone scaffold stimulates osteogenic differentiation. Materials Science and Engineering C, 108, 2020. http://dx.doi.org/10.1016/j.msec.2019.110374

[41] Z. Wang, A statistical homogenization approach for incorporating fiber aspect ratio distribution in large area polymer composite deposition additive manufacturing property predictions. Additive Manufacturing, 43, 2021. http://dx.doi.org/10.1016/j.addma.2021.102006

[42] Liu, T., Tian, X., Zhang, Y., Cao, Y., & Li, D. (2020). High-pressure interfacial impregnation by micro-screw in-situ extrusion for 3D printed continuous carbon fiber reinforced nylon composites. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 130(August 2019), 105770. https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2020.105770

[43] C.Vyas et al. 3D printing of silk microparticle reinforced polycaprolactone scaffolds for tissue engineering applications. Materials Science and Engineering C, 118, 2021. http://dx.doi.org/10.1016/j.msec.2020.111433

[44] A. Alexandre et al. Mechanical Properties of Direct Waste Printing of Polylactic Acid with Universal Pellets Extruder: Comparison to Fused Filament Fabrication on Open-Source Desktop Three-Dimensional Printers. 3D Printing and Additive Manufacturing, 7(5), 237–247. 2020. https://doi.org/10.1089/3dp.2019.0195

[45] S. Dertinger. Technical pathways for distributed recycling of polymer composites for distributed manufacturing: Windshield wiper blades. Resources, Conservation and Recycling, 157(March), 104810, 2020. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104810

[46] J. Franz. Open-Source Grinding Machine for Compression Screw Manufacturing. INVENTIONS, 5(3), 2020. https://doi.org/10.3390/inventions5030026

[47] H. A. Little et al. Towards distributed recycling with additive manufacturing of PET flake feedstocks. Materials, 13(19), 2020. http://dx.doi.org/10.3390/MA13194273

[48] M.J. Reich et al.Mechanical properties and applications of recycled polycarbonate particle material extrusion-based additive manufacturing. Materials, 12(10), 2019. https://doi.org/10.3390/ma12101642

[49] A.L. Woern et al. Fused particle fabrication 3-D printing: Recycled materials’ optimization and mechanical properties. Materials, 11(8). https://doi.org/10.3390/ma11081413

[50] A. Goyanes et al. Direct powder extrusion 3D printing: Fabrication of drug products using a novel single-step process. International Journal of Pharmaceutics, 567(May), 2019. https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2019.118471

[51] A. Samaro et al.. Can filaments, pellets and powder be used as feedstock to produce highly drug-loaded ethylene-vinyl acetate 3D printed tablets using extrusion-based additive manufacturing? International Journal of Pharmaceutics, 607, 120922, 2021. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2021.120922

[52] Z. Wang, Z.& D. E. Smith, (2019). Numerical analysis of screw swirling effects on fiber orientation in large area additive manufacturing polymer composite deposition. Composites Part B: Engineering, 177, 2019.

[53] P. Manideep et al.Design and development of pallet extruder. In V. T. V. K. S. S. B. B. S. K. K. (Ed.), AIP Conference Proceedings (Vol. 2200). American Institute of Physics Inc, 2019. https://doi.org/10.1063/1.5141260

[54] M. L. S, Dávila. RBS. Disponivel em: <https://docs.google.com/spreadsheets/d/1D3OOpZyGCXNSlX-wqd9KohEGP6tQIckT3va9Zr38gRQ/edit?usp=sharing>

[55] B. M. Boyle et al. 3D printing using powder melt extrusion. Additive Manufacturing, 29(May), 100811, 2019. https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100811

[56] A. B Chiaroni, A. B. & Z. C. Experimental and numerical evaluation of the temperature profile of a modular extrusion head applied to an experimental 3D printer. International Journal Of Advanced Manufacturing Technology, 103(9–12), 4385–4398, 2019. https://doi.org/10.1007/s00170-019-03859-z

[57] M. A. H. Khondoker & D. Sameoto. Direct coupling of fixed screw extruders using flexible heated hoses for FDM printing of extremely soft thermoplastic elastomers. Progress in Additive Manufacturing, 4(3), 2019. 197–209. https://doi.org/10.1007/s40964-019-00088-4

[58] L Schmidt et al. Characterization of a granulate-based strand deposition process in the FLM-method for definition of material-dependent process strategies. Rapid Prototyping Journal, 25(1), 104–116, 2019. https://doi.org/10.1108/RPJ-09-2017-0186

[59] J. Y. Tey et al. Development of 3D printer for functionally graded material using fused deposition modelling method. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 268(1).

[60] I. Daniyan et al.Thermal modelling and simulation of a screw extruder for additive manufacturing technology. Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management, 59, 53–59, 2020. https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85105564083&partnerID=40&md5=5ad876b3608f8e82622ae6d157661e16

[61] A. Gala et al. A Combined Experimental and Modeling Study for Pellet-Fed Extrusion-Based Additive Manufacturing to Evaluate the Impact of the Melting Efficiency. MATERIALS, 14(19), 2021. https://doi.org/10.3390/ma14195566

[62] A. Gala et al. Theoretical Evaluation of the Melting Efficiency for the Single-Screw Micro-Extrusion Process: The Case of 3D Printing of ABS. PROCESSES, 8(11), 2020. https://doi.org/10.3390/pr8111522

[63] R. J. Jackson et al.. 3D printing of asphalt and its effect on mechanical properties. Materials and Design, 2018. 160, 468–474. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.09.030

[64] N. Kumar et al. Investigations on the melt flow behaviour of aluminium filled ABS polymer composite for the extrusion-based additive manufacturing process. International Journal of Materials and Product Technology, 59(3), 194, 2019. https://doi.org/10.1504/ijmpt.2019.10024472

[65] S. Singamneni. Extrusion 3D printing of polybutyrate-adipate-terephthalate-polymer composites in the pellet form. Polymers, 10(8), 2018. https://doi.org/10.3390/polym10080922

[66] L. Sundermann et al. Development, construction and testing of a 3D-printing-system for additive manufacturing of carbon black filled rubber compounds. KGK Kautschuk Gummi Kunststoffe, 73(10),2020. 30–35

[67] J. Tian et al. Additive manufacturing of wood flour/polyhydroxyalkanoates (PHA) fully bio-based composites based on micro-screw extrusion system. Materials and Design, 199, 2021. http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2020.109418

[68] S. Whyman. Design and development of an extrusion system for 3D printing biopolymer pellets. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 96(9–12), 3417–3428, 2018. https://doi.org/10.1007/s00170-018-1843-y