

Article

# Uma Revisão Bibliográfica acerca da Inserção de Fibras Naturais em Processos Alternativos na Indústria 4.0 Visando uma Produção mais Limpa

Eduarda Bertoletti Duarte <sup>1</sup>, Luciana Cristina Soto Herek Rezende <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Mestranda em Tecnologias Limpas.Unicesumar; Maringá; Paraná; BR. ORCID: 0000-0001-9173-7056. E-mail: eduardabertoletti@gmail.com

<sup>2</sup> Doutora.Professora do Programa de Pós Graduação em Tecnologias Limpas e pesquisadora do Instituto Cesumar de Ciência, Tecnologia e Inovação. Unicesumar; Maringá; Paraná; BR. ORCID: 0000-0001-9677-4139. E-mail: lucianarezende17@gmail.com

## RESUMO

No Brasil são geradas cerca de 225.965 toneladas de resíduos diariamente, apesar da Política Nacional dos Resíduos Sólidos (Lei Federal nº 12.305/2010) ter sido implementada em 2010, um número expressivo destes ainda são eliminados e dispostos de forma incorreta no ambiente, acarretando problemas e contaminações. Com isso, destacam-se as pesquisas com vistas à valorização destes subprodutos em processos alternativos que almejam uma produção mais limpa adequando-se à indústria 4.0. Deste modo, o presente artigo teve como objetivo a avaliação de fibras naturais na impressão 3D a partir de uma revisão sistemática no modelo PRISMA nas bases Scopus, Science Direct, Web of Science e Capes. A pesquisa resultou em 86, 751, 36 e 95 artigos, respectivamente, após os critérios de elegibilidade e exclusão de artigos não relacionados, foram incluídos 157 artigos neste trabalho. Na análise da correlação entre as citações dos artigos selecionados foi utilizado o software VOSviewer® na construção do mapa de Cluster. Observou-se um crescimento dos estudos sobre o tema ao longo dos anos, fato evidente acerca da manufatura aditiva. Em relação as fibras naturais mais utilizadas para impressão 3D, todas foram fibras vegetais, nas quais a composição majoritária se dá pela celulose. Na avaliação da contribuição científica por país, destaca-se uma maior participação da Índia, Estados Unidos e China, respectivamente. O Brasil, por sua vez, se encontrou consideravelmente atrasado. Dessa forma, pode-se avaliar que, mesmo com legislações acerca de resíduos, o país ainda tem uma geração e disposição incorreta significativa e os estudos sobre novas tecnologias ainda são muito escassos quando comparados a outros países.

**Palabras-clave:** resíduos; fibras vegetais; impressão 3D.

## ABSTRACT

In Brazil, around 225,965 tons of waste are generated daily, despite the National Solid Waste Policy (Federal Law No. and contaminations. With this, research aimed at valuing these by-products in alternative processes that aim for cleaner production, adapting to industry 4.0, stands out. Thus, this article aimed to evaluate natural fibers in 3D printing based on a systematic review of the PRISMA model in the Scopus, Science Direct, Web of Science and Capes databases. The search resulted in 86, 751, 36 and 95 articles, respectively, with the eligibility criteria and exclusion of unrelated articles, 157 articles were included in this work. In the analysis of the correlation between the citations of the selected articles, the VOSviewer® software was used in the construction of the Cluster map. There has been an increase in studies on the subject over the years, an evident fact about additive manufacturing. Regarding the natural fibers most used for 3D printing, all were vegetable fibers, in which the majority composition is given by cellulose. In assessing the scientific contribution by country, the greater participation of India, the United States and China, respectively, stands out. Brazil, on the other hand, found itself considerably behind. Thus, it can be assessed that, even with legislation on waste, the country still has significant incorrect generation and disposal and studies on new technologies are still very scarce when compared to other countries.

**Keywords:** waste; vegetable fibers; 3D printing.



Submissão: 31/01/2023



Aceite: 10/10/2023



Publicação: 27/10/2023



## Introdução

Nos últimos anos, houve um crescimento exponencial urbano, segundo dados do Programa das Nações Unidas para os Assentamentos Humanos em 2020 foram contabilizados mais de 300.000 habitantes em metrópoles mundiais (ONU, 2020). Juntamente, com o aumento do poder aquisitivo da população, observa-se um aumento do consumo desse público e, conseqüentemente na produção para suprir a demanda (Bento et al., 2018; Silva et al., 2020).

Esse aumento na produção e consumo tem influência direta na expressiva geração de resíduos, tanto na quantidade, quanto à classificação dos tipos de resíduos, como maior quantidade de sintéticos, em decorrência da mudança dos processos e de produtos (Deus, 2020; Silva et al., 2020).

Historicamente, essa geração foi intensificada principalmente com as duas Revoluções Industriais, devido ao padrão de produção da época, trazendo dois grandes problemas: a degradação ambiental, originada da extração dos recursos naturais de forma excessiva e a poluição ambiental, em razão da deposição inadequada dos resíduos, além da modificação da natureza dos resíduos, antes naturais e biodegradáveis (Alves; Araújo, 2018; Armani; Torres; Krauspenhar, 2011; Ribeiro, 2007).

No entanto, apesar da problemática ambiental já estar bem estabelecida e perdurando décadas, até o final dos anos 70 a questão ambiental não estava entre as preocupações do Brasil, em que o objetivo principal se destacava no crescimento industrial e econômico (Figueiredo, 2018; Moura, 2016; Oliveira, 2012; Silva; Bassotto, 2021). Essa questão passa a ser considerada com o auxílio de pressões externas, no final dos anos 80, mas principalmente em função da Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e o Desenvolvimento em 1992 (ECO-92) (Almeida; Neumann; Sanches, 2018; Carvalho; Estender, 2017; Figueiredo, 2018).

Após a Eco-92, há uma mudança na postura do país e o conceito de desenvolvimento sustentável passa a ser mais consolidado, com a construção da Agenda 21, por exemplo (Almeida; Neumann; Sanches, 2018). Mas pode-se, também, afirmar que com a Conferência, houve um aumento da preocupação com as questões ambientais e acarretando um maior número de pesquisas, permeando o caráter público e privado, além de incentivar a criação de legislações acerca do meio ambiente (Figueiredo, 2018; Carvalho; Estender, 2017).

A geração, manipulação, destinação e o tratamento são os pontos principais da gestão sustentável dos resíduos, pois além da problemática da geração excessiva, há a preocupação com o impacto gerado pela sua disposição incorreta (Alfaia et al., 2017; Maiello et al., 2018; Silva et al., 2020)

Nesse contexto, em escala nacional, a Lei Federal nº 12.305/2010 que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), é considerada um grande avanço, justamente pela preocupação mediante a problemática da geração excessiva e o manejo inadequado dos resíduos (Alfaia et al., 2017; Bezerra; Campos, 2019).

A política estabeleceu diretrizes e instrumentos da gestão de resíduos sólidos, a responsabilidade compartilhada do ciclo de vida, além de colocar metas de erradicação de lixões, indicar o desenvolvimento sustentável e a ecoeficiência (Brasil, 2010). Com a PNRS, surge o conceito de responsabilidade compartilhada, aproximando a sociedade da gestão dos resíduos, além disso, a legislação incentiva um modelo circular de produção (Silva et al., 2020; Zago; Barros, 2019)

Entre os objetivos da Lei, destaca-se a redução, reutilização, reciclagem, tratamento e destinação final correta destes resíduos, além do incentivo às tecnologias limpas que visam a minimização dos impactos desses resíduos de forma sustentável (Brasil, 2010).

A gestão dos resíduos também foi um dos temas abordados na construção da Agenda 2030, outro grande marco em relação ao desenvolvimento sustentável, documento com um plano de ação contendo 17 objetivos para o desenvolvimento sustentável até 2030, incluindo temas como qualidade de meio ambiente, água, pobreza



e fome (NU Brasil, 2016). O objetivo 12 busca assegurar os padrões de produção e consumo mais sustentáveis e em sua meta 12.5 coloca como alvo a prevenção, redução, reciclagem e o reuso de resíduos (NU Brasil, 2016).

Nesse sentido, destaca-se uma das formas de tecnologia limpa para o desenvolvimento sustentável, a Produção Mais Limpa (P+L), de acordo com o CNTL (2003), sua definição se dá por uma estratégia eficiente e eficaz, integrada a processos e produtos, que busca otimizar o processo produtivo ao reduzir consumo de água, energia e matéria-prima e não gerar, minimizar ou reciclar os resíduos.

A P+L busca a ecoeficiência no uso dos recursos e segue o princípio da precaução, incentiva uma melhoria em todos os processos de produção de forma a reduzir custos, energia, matéria-prima, reduz uso de elementos tóxicos e resíduos, contribuindo com a sustentabilidade e aumentando o nível de competitividade no mercado da empresa (Santos; Silva, 2017; Silva et al., 2017).

A produção mais limpa tem como característica a aplicação contínua e uma mudança em todos os níveis hierárquicos da empresa, a mudança deve transpassar todos os processos e funcionários (Costa; Prado Filho; Fonseca, 2017; Oliveira; Pereira, 2017; Yong et al., 2016). Essa abordagem pode atuar em mudanças nas matérias-primas utilizadas, nas tecnologias utilizadas e, nos produtos e serviços oferecidos, dessa forma, busca-se uma redução do uso de matéria-prima indevida ou tóxica, tecnologias não eficientes que geram uma quantidade alta de resíduos e uma alteração na composição do produto (Costa; Prado Filho; Fonseca, 2017; Santos; Silva, 2017; Santos; Carneiro; Ramalho, 2015)

Há diversas formas de aplicar a P+L, e no contexto da indústria 4.0 destaca-se a manufatura aditiva (MA). A quarta revolução industrial está crescendo exponencialmente, permitindo a intercomunicação entre computadores, materiais e máquinas inteligentes e processos mais eficientes (Ghobakhloo, 2020; Santos et al., 2020). Entre as técnicas eficientes da indústria 4.0 surgiu a manufatura aditiva, também conhecida como Impressão 3D, permitindo a fabricação de produtos personalizados de forma descentralizada, reduzindo estoques de fábrica (Dilberoglu et al., 2017; Pereira; Simonetto, 2018; Santos et al., 2020)

Essa tecnologia emergente é definida pelo processo de impressão de materiais em três dimensões com modelagem e definição em programas associados à impressora (Baghia; Sehfal, 2021).

A MA tem como característica a produção a partir de adições de materiais por meio de camadas sucessivas, utilizando principalmente termoplásticos, o que difere da manufatura convencional (Shanmugam et al., 2021). Essa tecnologia inovadora vem sendo amplamente na indústria, especialmente entre os setores automotivo, aeroespacial e construtivo, com construção de edifícios e apartamentos, pontes e viadutos, indústria médica e eletrônica (Baghia; Sehfal, 2021; Daminabo et al., 2020; Saran et al., 2022).

No contexto de preocupações ambientais, há uma crescente de estudos com a inserção de fibras naturais em processos já estabelecidos em matrizes sintéticas e/ou não recicláveis (Balla et al., 2019; Fico et al., 2022). Estima-se que a produção de biocompósitos a partir da manufatura aditiva apresente um crescimento comercial e industrial, e que a pesquisa acompanhe este setor (Baghia et al., 2021)

Essa busca por processos mais sustentáveis e eficientes vem impulsionando a adição de subprodutos na matriz polimérica para impressão 3D, resolvendo a questão do excesso de resíduos no ambiente, além da valorização do subproduto e economia de matéria-prima (Balla et al., 2019; Fico et al., 2022).

No entanto, nota-se que mesmo com a criação da PNRS, ainda há barreiras significativas na gestão adequada dos resíduos, se observa que a geração de resíduos no país vem aumentando em uma crescente considerável. Como apresentado pelo Panorama de Resíduos Sólidos no Brasil de 2021 (ABRELPE, 2021), o ano de 2020 é representado pelo modo remoto, o que trouxe aos resultados uma maior geração doméstica (Abel, 2021). Segundo dados da ABRELPE (2021) estima-se que a geração anual foi de 82,5 milhões de toneladas, ou seja, cada pessoa gerou 1,07 kg de resíduo por dia, sendo o Sudeste a região com maior geração.



Dessa forma, é possível verificar a necessidade de novas tecnologias eficientes e sustentáveis que reduzam a geração desses resíduos ao inclui-los em novas cadeias de forma a minimizar o seu descarte precoce e inadequado. Neste cenário, o presente trabalho tem como objetivo abordar acerca da inserção de fibras naturais em processos alternativos de avanço tecnológico, de forma a contribuir com o desenvolvimento de uma sociedade mais sustentável.

## 2. Materiais e métodos

O presente trabalho teve seu início com uma revisão sistemática ampla e criteriosa baseada na metodologia PRISMA sobre a viabilidade da inserção de fibras naturais em processos alternativos visando uma produção mais limpa (Figura 1). Uma revisão bibliográfica deve seguir procedimentos metodológicos para que seja bem construída e apresente dados seguros. Assim, a metodologia Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA) tem como objetivo proporcionar diretrizes na elaboração de uma revisão, que consiste em um checklist de 27 itens e um fluxograma, para auxiliar os autores na construção, desenvolvimento e análise da sua revisão bibliográfica (Galvão et al., 2015). A metodologia é atualizada periodicamente e fornece orientações para revisões sistemáticas na identificação, seleção, avaliação e sintetização dos estudos encontrados (Page et al., 2023).

A pesquisa foi realizada nas bases de dados Scopus, Science Direct, Web of Science e Capes utilizando o descritor (“natural fiber” AND “3D printing”). Foram utilizados filtros de data de publicação de 2010-2023, documentos que não eram artigos e áreas de publicação na biomedicina.

Os artigos encontrados durante a busca foram indexados no programa Zotero®, onde foi possível realizar a exclusão de artigos duplicados. Durante a leitura dos resumos e títulos, foi feita a exclusão de artigos com temas de área medicinal e artigos que não utilizaram manufatura aditiva.

Após a exclusão, os artigos selecionados para a leitura na íntegra foram exportados ao programa Excel® versão 365 para permitir a leitura e avaliação da aderência ao tema desta pesquisa. E com a leitura, foi feita a exclusão dos artigos que não utilizassem fibras naturais, além de artigos que utilizassem fibras de madeira, cânhamo ou kenaf. A fim de buscar fibras naturais alternativas as mais utilizadas, como a madeira, e fibras não permitidas ao uso no Brasil como cânhamo e kenaf, foram excluídos. Além disso, foram excluídos artigos duplicados restantes.

Assim, a partir das etapas propostas na metodologia PRISMA, foi possível chegar aos 157 artigos incluídos nesta revisão, metodologia expressa na Figura 1

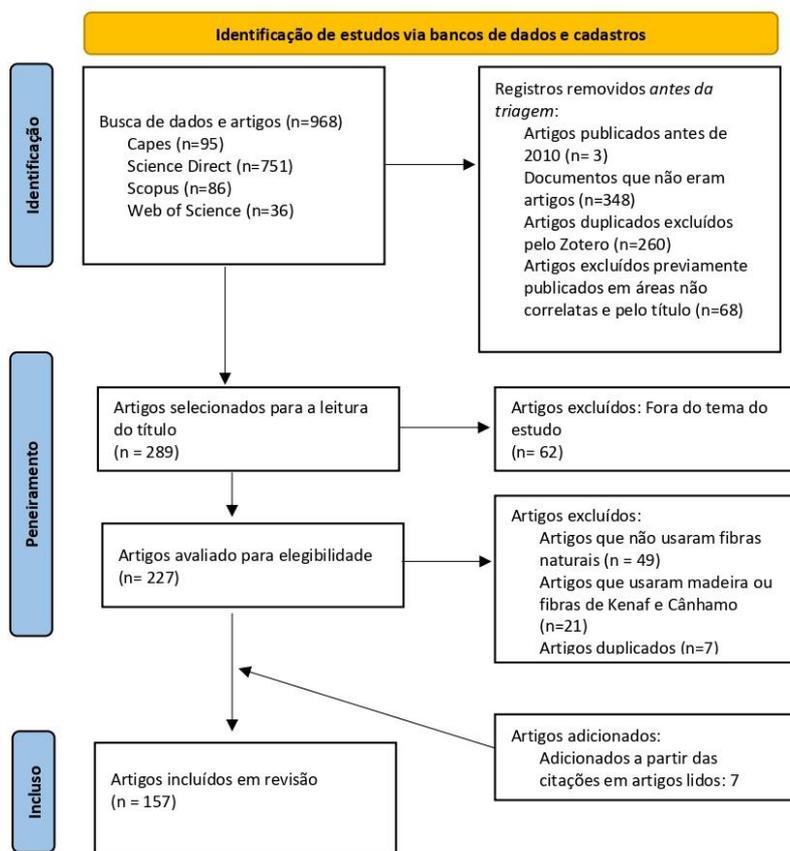


Figura 1. Fluxograma baseado no modelo PRISMA com os resultados da seleção de artigos. Fonte: PRISMA Statement (2020)

Os critérios de seleção foram escolhidos para refinar a busca, permitindo a inclusão de artigos que abordaram temas como a adição de fibras naturais na manufatura aditiva, excluindo artigos na área medicinal, que não usassem fibras naturais ou manufatura aditiva e artigos que utilizaram fibra de madeira, kenaf ou cânhamo. A busca incluiu artigos publicados no idioma inglês.

Na última etapa da metodologia, foi gerado o mapa de Cluster a partir dos dados coletados da base científica Web of Science, a fim de verificar a correlação entre as citações presentes nos artigos a partir do software VOSviewer®.

Após a análise criteriosa dos dados obtidos, foi possível construir o estudo sobre a análise da viabilidade das fibras naturais em diferentes processos alternativos.

### 3. Resultados e discussão

A manufatura aditiva apresenta diferentes tipos de técnicas para impressão, que vão variar na estrutura, material utilizado, tamanho, precisão e custo, as principais técnicas utilizadas são Modelagem por Deposição de Material Fundido (FDM), Estereolitografia (SLA) e Sinterização a Laser Seletiva (SLS) (Santos et al., 2018).

A modelagem por deposição de material fundido (FDM) é uma das técnicas mais populares, como já mencionado acima, nessa técnica o produto é construído a partir de deposição seguidas de camadas, e essa deposição ocorre a partir do derretimento parcial e extrusão do filamento termoplástico em um bico circular controlado (Baghia et al., 2021; Ganguly et al., 2022; Stoof; Pickering, 2018). Esses filamentos são derretidos e depositados sucessivamente em camadas, seguindo um padrão calculado e programado pelo software que



controla a impressora e reproduz a geometria desejada, onde a principal vantagem da técnica é o baixo custo (Balla et al., 2020; Mazzanti; Malaguittie; Mollica, 2019; Morales et al., 2021).

O FDM é também conhecido fabricação de filamentos fundidos (FFF), e tem como matéria-prima principal os termoplásticos, apesar de uma variedade de outros materiais ser compatível com a máquina (CANO-Vicent, 2021; Stoof; Pickering; Zhang, 2017). Entre os mais utilizados comercialmente estão o PolíAcido Láctico (PLA) e Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS) (Arockiam et al., 2021; Baghia et al., 2021). Esses termoplásticos amorfos ou de baixa cristalinidade, vão apresentar um baixo grau de empenamento, o que contribui para a precisão, tornando-os eficientes como filamentos (Morales et al., 2021; Stoof; Pickering, 2018).

O PLA é um dos mais populares na utilização na impressão por FDM, devido suas características biodegradáveis, biocompatíveis e resistência, além de ser renovável por ser obtidos de fontes como trigo, milho, arroz e batata-doce, e possuir um consumo baixo de energia e emissão de gases de efeito estufa (GEEs) durante sua produção (Arockiam et al., 2021; Rajeshkumar et al., 2021).

Apesar de suas vantagens, o PLA possui algumas características limitantes a produção comercial, como a baixa tenacidade e temperatura de transição vítrea e sua natureza hidrofílica, uma das alternativas estudadas é a adição de fibras naturais juntamente com o termoplástico na matriz da impressão 3D, o que auxiliaria a reduzir as barreiras do uso do PLA sozinho (Cano-Vicent, 2021; Rajeshkumar et al., 2021).

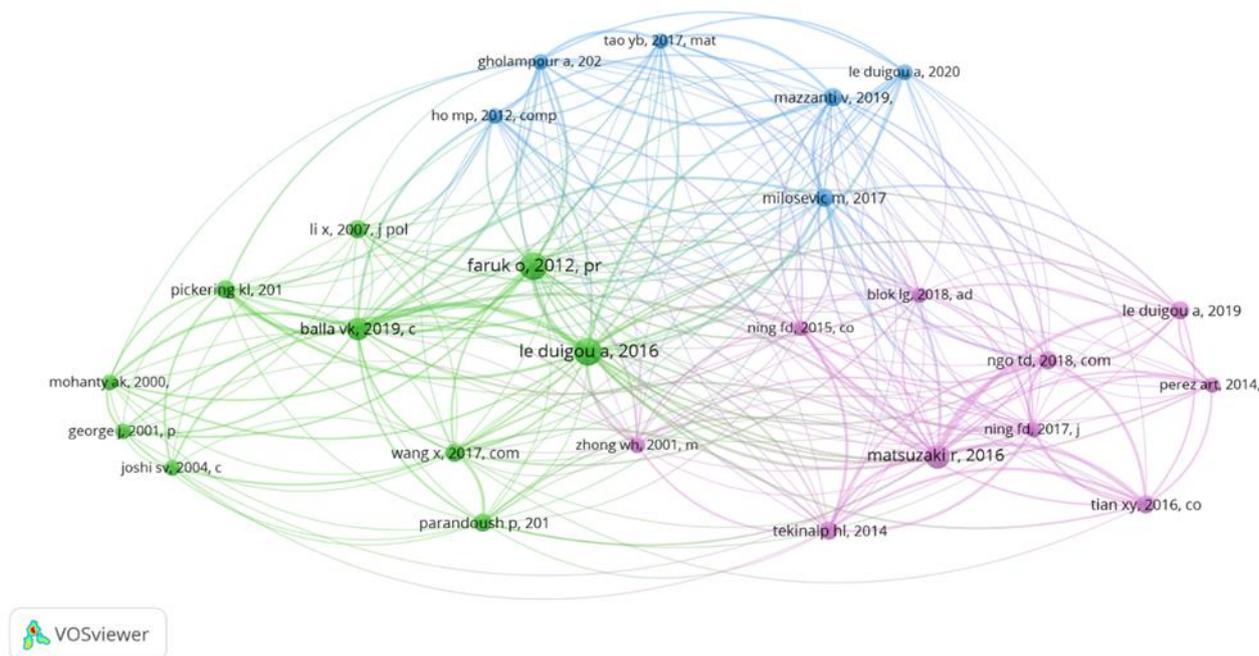
Essa associação bem sucedida foi estudada por Suteja, (2020), ao incluírem a fibra da folha do abacaxi como reforço do compósito PLA para impressão 3D FDM, essa adição aumentou a resistência à tração do compósito, não aumentou o valor do erro dimensional da peça e o tempo de produção não foi alterado. No entanto, foi observado uma redução no alongamento da peça, sendo necessários novos estudos para melhorar a característica mecânica dessa associação, apesar da eficiência já comprovada.

Dessa forma, a técnica FDM vem sendo amplamente utilizada para produção de biocompósitos, na qual o uso de fibras naturais na matriz polimérica é realizado, por serem de baixo custo, alta disponibilidade no ambiente, alta resistência, força e elasticidade (Deb; Jafferson, 2021).

No entanto, algumas características das fibras podem dificultar a adesão com a matriz polimérica e alterar as propriedades mecânicas do filamento, se fazendo necessários pré-tratamentos, modificações e tecnologias para alterar a fibra, Fouladi et al., (2020) realizaram a impressão por FDM utilizando PLA, fibras e cascas de coco, onde as fibras naturais foram modificadas com tratamento alcalino antes de serem incorporadas à matriz. Já Le Duigou et al., (2019) realizaram um processo de coextrusão personalizado da fibra de linho e PLA para produzir filamentos com melhores propriedades mecânicas.

Outra análise realizada foi a de co-citação de autores, utilizando o software VOSviewer® em relação a base de dados Web of Science. Ocorre a verificação das referências bibliográficas entre os trabalhos linkados e, então, há a ligação entre os citados (Pinto, 2022).

A Figura 2 mostra a relação de co-citação entre os trabalhos encontrados a partir do descritor ("natural fiber" AND "3D printing").



**Figura 2.** Rede de cocitação de autores por descritor ("natural fiber" AND "3D printing"). Fonte: Autores (2022)

Após incluir os dados no software, foram identificados 2223 autores citados, mas devido ao número significativo, foi inserido um critério do mínimo de 4 citações por autor, reduzindo, assim, para 26 referências citadas.

É possível observar a formação de 3 grupos (clusters). O primeiro (vermelho) com 10 itens, assim como o segundo (verde) com 10 itens, enquanto o terceiro (azul) com 6 itens. Também é demonstrado os autores de maior relevância, aqueles com um número maior de ligações, Le Duigou et al. (2016), Balla et al. (2019), Matsuzaki et al. (2016), Faruk et al. (2012) e Milosevic et al. (2017), todos com mais de 40 ligações.

Considerando este resultado, os trabalhos foram avaliados a partir da Tabela 1, em que foi possível observar a classificação dos clusters de acordo com o tema principal dos artigos.

**Tabela 1.** Divisão dos artigos incluídos nos clusters

Tema	Autor	Local	Tipo	Objetivo do estudo	Citações
Propriedades mecânicas	Le Duigou <i>et al.</i> , 2020	França	Revisão	Estudo do estado de arte de impressão 3D e 4D utilizando fibras naturais para fins mecânicos	68
	Gholampour <i>et al.</i> , 2020	Austrália	Revisão	Revisão de artigos publicados desde 1978 acerca de compósitos reforçados com fibras naturais	222



Tema	Autor	Local	Tipo	Objetivo do estudo	Citações
	Mazzanti <i>et al.</i> , 2019	Itália	Revisão	Revisão das propriedades mecânicas de compósitos impressos com fibras naturais e problemas atuais	183
	Milosevic <i>et al.</i> , 2017	Nova Zelândia	Experimental	Cânhamo e Harake usadas como reforço em compósitos impressos por FDM	59
	Tao <i>et al.</i> , 2017	China	Experimental	Filamento de PLA e Farinha de madeira, avaliando propriedades mecânicas e térmicas	132
	Ho <i>et al.</i> , 2012	Austrália	Revisão	Revisão sobre as fibras naturais amplamente utilizadas em compósitos, além das propriedades mecânicas e térmicas	381
	Balla <i>et al.</i> , 2019	Estados Unidos	Revisão	Revisão de fibras naturais e suas propriedades, utilizadas em compósitos e na impressão 3D	194
	Parandoush <i>et al.</i> , 2017	Estados Unidos	Revisão	Revisão dos avanços da impressão 3D na formação de compósitos reforçados com fibras (não foca em naturais)	580
	Wang <i>et al.</i> , 2017	Estados Unidos	Revisão	Revisão sobre a impressão 3D de compósitos (não foca em naturais)	1699
Biocompósitos	Le Duigou <i>et al.</i> , 2016	França	Experimental	Impressão de um biocompósito de madeira e propriedades higromecânicas	278
	Pickering <i>et al.</i> , 2016	Nova Zelândia	Revisão	Revisão sobre o avanço de compósitos reforçados com fibras naturais e propriedades mecânicas	1808



Tema	Autor	Local	Tipo	Objetivo do estudo	Citações
FDM	Faruk <i>et al.</i> , 2012	Alemanha	Revisão	Revisão da evolução de estudos sobre compósitos reforçados com fibras naturais	2624
	Li <i>et al.</i> , 2007	Canadá	Revisão	Revisão de tratamento químico em fibras naturais para compósitos	1746
	Joshi <i>et al.</i> , 2004	Estados Unidos	Revisão	Estudo comparativo entre compósitos de fibra de vidro e biocompósitos	1634
	George <i>et al.</i> , 2001	Holanda	Revisão	Revisão sobre tratamentos na superfície de fibras naturais para a formação de compósitos	784
	Mohanty <i>et al.</i> , 2000	Alemanha	Revisão	Revisão sobre fibras naturais, polímeros biodegradáveis e biocompósitos	1894
	Le duigou <i>et al.</i> , 2019	França	Experimental	Impressão FDM de biocomposito reforçado com fibra de linho	89
	Block <i>et al.</i> , 2018	Reino Unido	Revisão	Investigadas as matérias-primas para impressão FDM (foco em fibra de carbono)	414
	Ngo <i>et al.</i> , 2018	Austrália	Revisão	Revisão dos principais métodos de impressão 3D	3016
	Ning <i>et al.</i> , 2017	Estados Unidos	Experimental	Fabricação de peças a partir da impressão FDM com fibra de carbono	300
	Matsuzaki <i>et al.</i> , 2016	Japão	Experimental	Método de impressão FDM sem molde e com PLA e fibra de carbono/juta	73
Tian <i>et al.</i> , 2016	China	Experimental	Fabricação de compósitos a partir da impressão FDM e fibra de carbono com PLA	595	



Tema	Autor	Local	Tipo	Objetivo do estudo	Citações
	Ning <i>et al.</i> , 2015	Estados Unidos	Experimental	Compósitos de fibra de carbono impressos por FDM	946
	Perez <i>et al.</i> , 2014	Estados Unidos	Experimental	ABS como material para compósitos impressos	246
	Tekinalp <i>et al.</i> , 2014	Estados Unidos	Experimental	Compósitos de fibra de carbono e ABS impressos por FDM	856
	Zhong <i>et al.</i> , 2001	China	Experimental	Uso do ABS e reforço com fibra de vidro na impressão de compósitos por FDM	490

Fonte: Autores (2022)

Os artigos incluídos no cluster azul, tiveram como tema principal em comum, a avaliação das propriedades mecânicas de fibras e filamentos. Já o grupo vermelho, incluiu aqueles que buscaram estudar a formação de biocompósitos, compósitos verdes a partir de fibras naturais. Enquanto o cluster verde, contou com os estudos sobre o método de impressão FDM, em especial a impressão de compósitos a partir desta técnica, além de grande parte destes artigos utilizarem a fibra de carbono como matéria-prima.

Na Tabela 1, também pode-se avaliar a internacionalidade dos artigos citados, com uma diversidade de países com contribuições de estudos acerca do tema buscado.

A análise de cocitações permitiu compreender ainda a ligação entre os artigos de temas mais próximos demonstrada na Figura 3, além disso, é possível observar a ligação entre trabalhos de clusters diferentes, demonstrando a interdisciplinaridade do tema.

Já, em relação a produção científica, de acordo com o levantamento feito, foi possível observar o crescimento exponencial das pesquisas sobre fibras naturais na impressão 3D pela Figura 3.

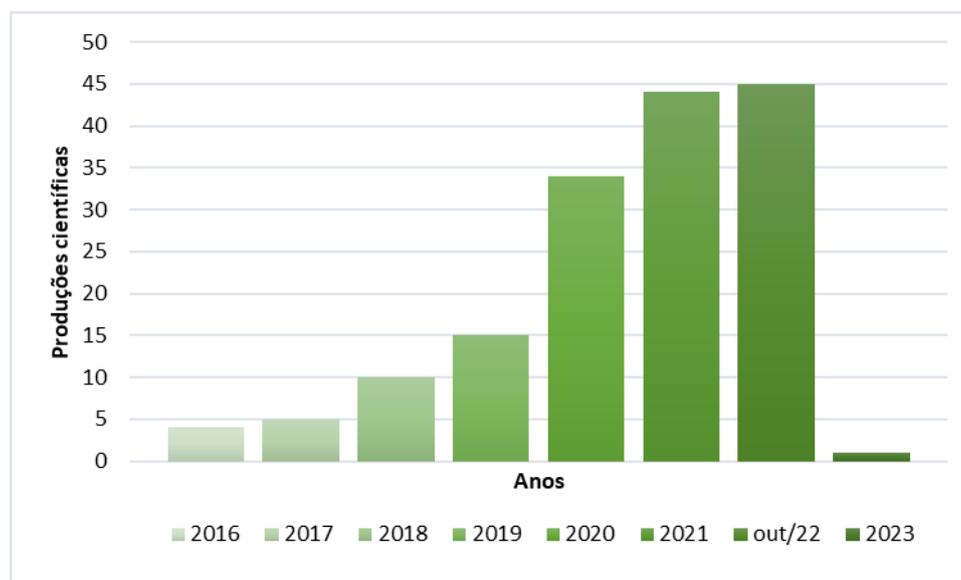


Figura 3. Evolução da pesquisa sobre impressão 3D ao longo dos anos. Fonte: Autores (2022)



A pesquisa científica com fibras naturais associadas a manufatura aditiva passa a surgir com maior força a partir de 2016, como demonstrado na Figura 5. Mazzanti e colaboradores (2019) relatam a dificuldade e obstáculos da inserção da fibra se dão justamente pela literatura ser tão recente, como a escolha da matriz, metodologia do processamento, tratamento e pré-processamento.

É possível observar um grande crescimento, especialmente a partir de 2020, podendo ser justificado pela expansão da indústria 4.0. A manufatura aditiva é uma tecnologia de extrema importância para a quarta revolução industrial, ao permitir uma mudança na forma de produção, reduzindo etapas excessivas, economia de material e pelo fato de proporcionar uma maior eficiência, além disso, permite processos mais sustentáveis, pelo desenho de ciclos de vida fechados (Inácio et al., 2020; Sanches; Carvalho; Gomes, 2019).

Por meio de uma revisão sistemática, Germano, Mello e Motta (2021) verificaram a contribuição da indústria 4.0 para a sustentabilidade e o mesmo crescimento no período apresentado neste estudo. Le Duigou et al. (2019) também mencionaram o crescimento do interesse por fibras naturais na matriz de filamentos extrusados pela FDM.

Balla et al. (2020) desenvolveram um compósito de copoliéster termoplástico reforçado com casca de soja impressos pela técnica FDM, concluindo que com o tratamento de hidrólise ácida a casca de soja apresenta um grande potencial na fabricação de compósito, permitindo a valorização de um resíduo gerado em grandes quantidades anualmente nos Estados Unidos.

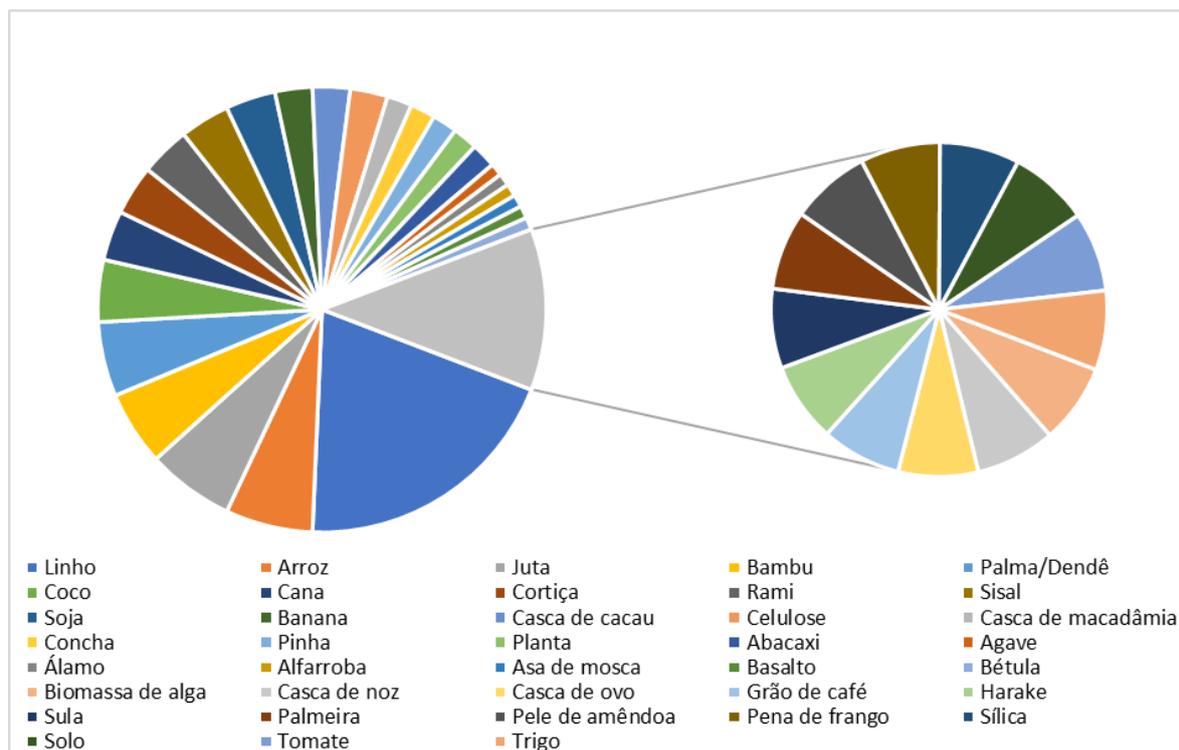
Já Ahmad et al. (2021) avaliaram o uso de fibra de palma de dendê como matriz polimérica juntamente com ABS e como resultado, concluíram que a fibra pode ser utilizada como matéria-prima para a FDM, além da busca futura para a fabricação de filamentos de arame.

Outros trabalhos também avaliaram compósitos formados a partir da impressão 3D FDM utilizando fibras naturais. Depuydt et al. (2019) avaliaram a produção de compósitos utilizando PLA, fibra de linho e de bambu. Franco-Urquiza (2021; 2022) avaliaram a fibra de juta como matriz polimérica juntamente com PLA. Já Morales et al. (2021) utilizaram casca de arroz e polipropileno reciclado (PPR) para desenvolver filamentos de impressão sustentáveis.

No entanto, apesar desse crescimento, estudos sobre a sustentabilidade na indústria 4.0 ainda estão se consolidando, pois, as pesquisas se encontram na fase embrionária. Estudos que avaliam os resultados da implantação de tecnologia ainda são escassos, sendo encontrados em maior quantidade os trabalhos de revisão (Germano; Mello; Motta, 2021; Mazzanti; Malaguittie; Mollica, 2019).

Durante o levantamento sistemático, foi possível observar uma participação consideravelmente alta de artigos do tipo revisão, com cerca de 41% de participação, já os trabalhos experimentais representaram a maioria dos artigos incluídos com 59% dos trabalhos. Para a contabilização das fibras naturais mais utilizadas, foram incluídos apenas os trabalhos do tipo experimental.

Em relação aos tipos de fibras utilizadas como matriz na impressão 3D, a Figura 4 apresenta as encontradas entre os artigos selecionados.



**Figura 4.** Fibras naturais utilizadas na impressão 3D. Fonte: Autores (2022)

Em razão do foco do trabalho ser fibras alternativas, artigos que mencionavam fibras já muito bem estabelecidas como a madeira ou com localização muito distante do Brasil, kenaf e cânhamo, foram excluídos durante o levantamento. Ao final, ao todo foram encontrados 38 diferentes tipos de fibras.

É possível observar que as fibras como linho, arroz, juta, palma/dendê, bambu e coco apresentaram mais de 5 artigos os mencionando, podendo inferir que essas, até hoje, são as fibras mais estudadas na sua utilização em impressão 3D pela técnica FDM. Além disso, cana, cortiça, rami, sisal e soja são fibras que também apresentaram resultados significativos com a presença em artigos, também podendo avaliar seu uso dentro da impressão 3D.

As fibras naturais são uma classificação de acordo com sua origem, e essa classe inclui fibras orgânicas produzidas por animais, orgânicas produzidas por vegetais e as inorgânicas minerais (Beckman et al., 2021). Ao observar a Figura 5, tem-se a participação majoritária de fibras orgânicas vegetais, compostas principalmente por celulose, um polímero de cadeia longa de moléculas de glicose (Fico et al., 2022). As fibras naturais animais e minerais, apesar de presentes, representam uma porcentagem relativamente pequena, podendo inferir um uso maior de fibras vegetais na manufatura aditiva.

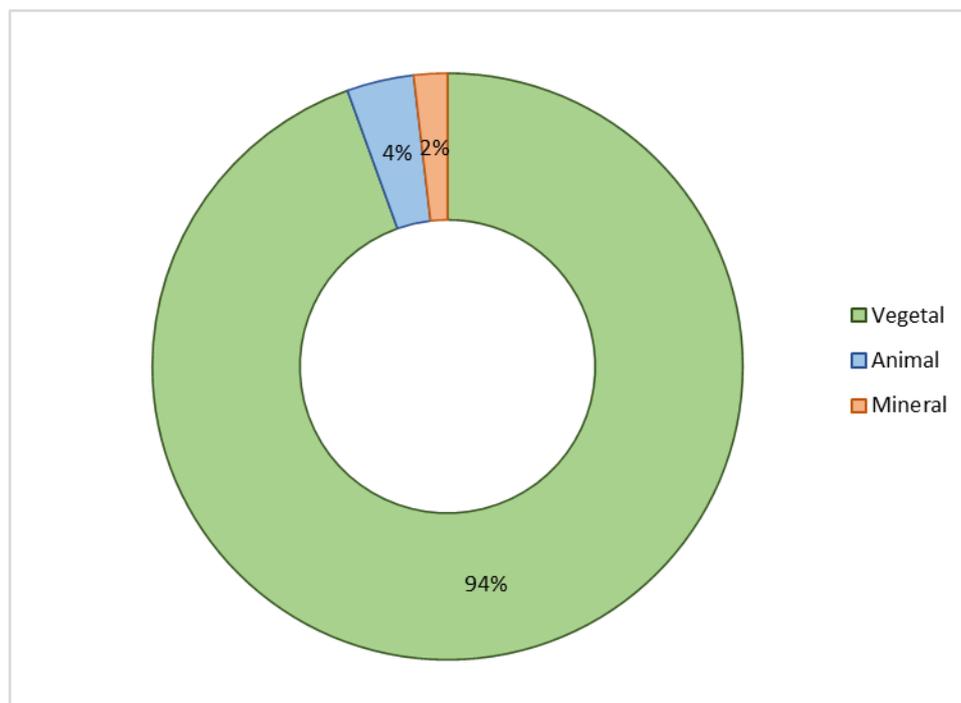


Figura 5. Classificação de fibras naturais. Fonte: Autores (2022)

Fibras vegetais podem ter diferentes origens, como semente, caule, folha, casca (Beckman et al., 2021; Ganguly et al., 2022). Linho e juta, são fibras de caule, casca de arroz e palma/dendê são as fibras provenientes de semente e frutos; a fibra de coco é proveniente da casca e o bambu é uma fibra originada de grama (Beckman et al., 2021; Ganguly et al., 2022; Ilyas et al., 2021).

Em relação à aplicabilidade, Wang (2020) desenvolveram um filamento biocompósitos de nanofibrilas de celulose e PLA para modelagem de deposição fundida (FDM) com um grande potencial em wearables, os “dispositivos vestíveis”, mas que novos estudos devem avaliar as propriedades de conforto em produtos têxteis e de vestuário. Wang (2022) trouxeram uma proposta mais sustentável às máscaras descartáveis utilizadas em larga escala nos dois anos de pandemia, ao desenvolverem uma máscara facial biodegradável e eficiente a partir da matriz imprimível com folha de bananeira, polipropileno (PP) e fio de seda.

Já, Figueroa-Velarde et al., (2021) observaram uma aplicabilidade de fibra natural em impressora FDM em outro setor, filamentos à base de ácido polilático (PLA) foram preenchidos com fibras de agave podem ser úteis na fabricação 3D de brinquedos. Outro setor beneficiado com a manufatura aditiva foi o da saúde, exposto por Cali et al., (2020) ao apresentarem uma prótese cervical externa para correção de coluna vertebral com filamentos de cânhamo.

Enquanto no trabalho de Anandkumar, Babu e Sathyamurthy (2021) foram utilizadas diferentes fibras e utilizada técnica de manufatura aditiva híbrida, a máquina de modelagem depositada fundida (FDM) é modificada combinando com a modelagem de deposição de forma (SDM). O compósito desenvolvido a partir das fibras de cana-de-açúcar, juta, rami, banana, fibra de abacaxi e pó de concha, é uma alternativa viável nos setores de automotivas, embalagem, biomédica, construção e engenharia, permitindo aprimorar metodologia e fibras para aplicações específicas.

No entanto, ao realizar o estudo, observou-se que grande parte dos artigos desenvolveu filamentos para a impressão 3D, estudaram a viabilidade da impressão e testes mecânicos, mas sem pontuar de forma direta qual seria a aplicabilidade do projeto. Esses trabalhos, avaliam o filamento e servem de base para novas pesquisas



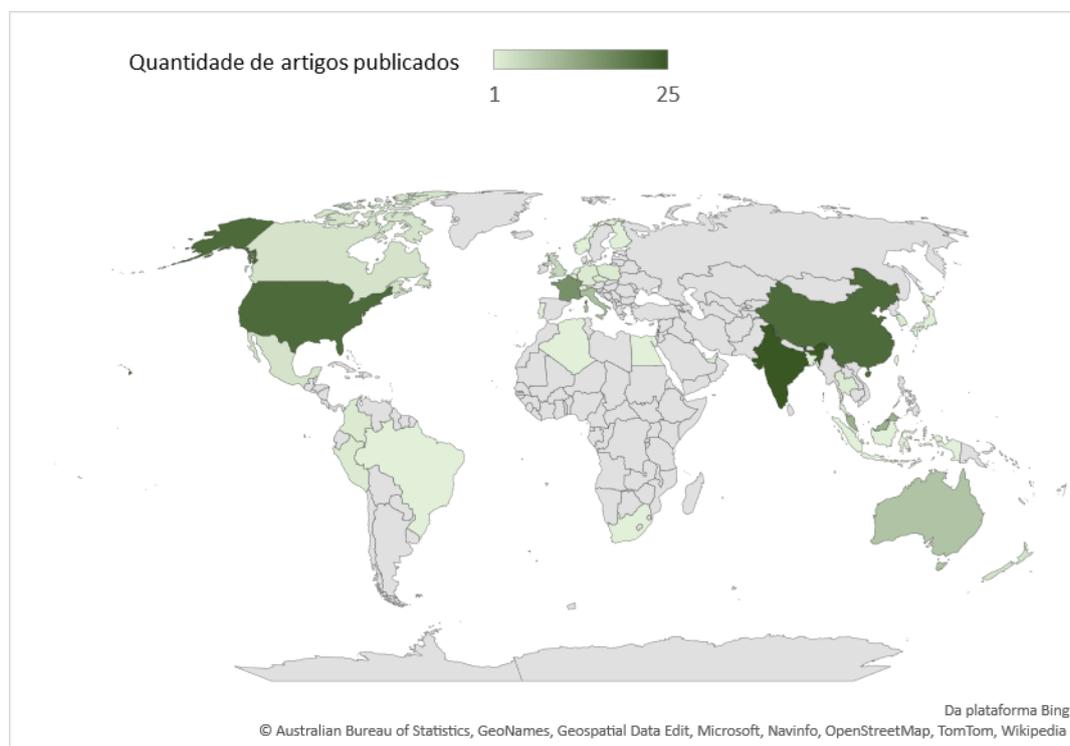
buscarem o uso do filamento em setores e utilidades específicos (Arockiam et al., 2021; Baghia, 2021; Morales et al., 2021; Royan et al., 2021; Shahinur et al., 2022; Silva et al., 2020).

Como explorado por Matsuzaki et al., (2016), a impressão 3D tem se focando principalmente em produtos testes, mas sem a produção de componentes estruturais para a produção de produtos aeroespaciais e automotivos, sendo um dos principais objetivos da indústria.

Esses resultados podem ser explicados pela inclusão de fibras naturais em impressão 3D ser um avanço, consideravelmente novo, o que se observa pela ausência de uma padronização da aplicação e de projetos em FDM demonstrando a necessidade de pesquisas futuros, e padronização de propriedades mecânicas como exposto por Le Duigou et al., (2020), Shanmugam et al., 2021 e Stoof, Pickering e Zhang (2017).

As pesquisas realizadas com impressão FDM e fibras naturais, ainda estão sendo usadas como modelos experimentais e conceituais, e não componentes funcionais em decorrência das propriedades mecânicas (Ainda et al., 2022; Shanmugam, 2021). As questões de adesão da fibra à matriz, natureza hidrofílica da fibra e as propriedades mecânicas, são alguns dos maiores desafios na impressão 3D e na eficiência do biocompósito impresso, o que também pode explicar a lacuna de artigos com aplicações específicas (Arockiam et al., 2021; Balla et al., 2019; Ganguly et al., 2022).

Em diversos países há um aumento nas pesquisas desta área por conta de demandas de preocupação ambiental, em busca de materiais renováveis e biocompósitos, como se observa na Figura 6 (Balla et al., 2019). Onde avalia-se a contribuição dos países na comunidade científica com estudos de processos mais sustentáveis e destinação às fibras naturais dentro na Indústria 4.0, especialmente estudos impressão 3D por meio de um mapa coroplético realizado por meio do programa Excel® versão 365.



**Figura 6.** Contribuição de artigos por país. Fonte: Autores (2022)



Os mapas coropléticos são amplamente utilizados em estudos de distribuição espacial de resultados, permitindo uma representação temática de natureza quantitativa, associado a uma variação de dados representado por uma escala de coloração (Archela; Archela, 2006; Ramos et al., 2016). Na Figura 6, é apresentada uma escala na coloração verde mais claro para países com apenas 1 artigo publicado até o máximo de 25 artigos publicados pelo país, representado pelo verde escuro.

Ao total foram encontrados artigos de 33 países, no entanto, Índia, Estados Unidos e China foram os países que contribuíram significativamente mais, onde todos apresentaram mais de 20 publicações cada. Além disso, Estados Unidos e China apresentaram o mesmo número de artigos publicados. Ao observar a publicação total dos países, essas três nações juntas somam mais de 40% do total dos países encontrados. França e Malásia também apresentam uma produção acadêmica relevante, com mais de 10 artigos publicados por país.

Conforme a pesquisa realizada esses números apresentados deve-se ao fato de que na manufatura aditiva várias técnicas são empregadas, e a seleção da tecnologia depende da finalidade da peça produzida, como demonstrado na Tabela 2, apresentando a classificação destas tecnologias proposta por Guo e Leu (2013), que consideram quatro categorias de matéria prima utilizada na fabricação: líquido, filamento/pasta, pó e placa sólida (Rodrigues et al., 2017).

**Tabela 2.** Caracterização das técnicas de manufatura aditiva

<b>Matéria-prima</b>	<b>Processo</b>	<b>Material</b>	<b>Princípio</b>
Líquido	Estereolitografia (SLA)	Polímeros fotossensíveis	Produção de peças de polímero a partir da solidificação destes com um laser
	MultiJet (MJP)	Acrílico fotossensível, plástico e cera	Produção de peças a partir da solidificação do material depositado por flash de uma iluminação ultravioleta (UV)
	Rapid Freezing Prototyping (RFP)	Água	Produção de peças a partir do congelamento das gotículas de água depositadas
Filamento/Pasta	Modelagem por deposição de material fundido (FDM)	Termoplásticos	Produção de peças por extrusão do plástico por bico extrusor em uma base
	Robocasting	Pasta cerâmica	Produção de peças com a extrusão da pasta
	Freeze-form Extrusion Fabrication (FEF)	Pasta cerâmica e água	Produção de peças com a extrusão de pasta cerâmica aquosa
Pó	Sinterização seletiva a laser (SLS)	Nylon, Aço inoxidável, Alumínio, Titânio, Cobalto-Cromo, Inconel	Produção de peças por meio do processo de sinterização de camadas de pó



<b>Matéria-prima</b>	<b>Processo</b>	<b>Material</b>	<b>Princípio</b>
	Selective Laser Melting (SLM)	Alumínio, Cobalto-Cromo, Inconel, Aço inoxidável, Titânio, Aço maraging	Produção de peças de metal por meio da fusão de camadas de pó de metal por um laser
	Electron Beam Melting (EBM)	Cobalto-Cromo, Titânio	Produção de peças de metal por meio da fusão de camadas de pó de metal por um arco elétrico
	Deposição de metal a laser (LMD)	Alumínio, Cobalto-Cromo, Inconel, Aço inoxidável, Titânio, Aço maraging	Produção de peças através da fusão completa de pó de metal
	Impressão Tridimensional (3DP)	Polímeros, metais, cerâmica e outros pós	Produção de peças pela deposição de pó sobre uma base, que é unido seletivamente pela injeção de aglutinante
Placa Sólida	Manufatura de objeto em lâminas (LOM)	Papel, plástico, metal	Produção de peças pela união de uma camada de material laminado a uma série de outras lâminas conformadas

Fonte: Adaptado de Rodrigues et al., 2017

Há uma gama variada de técnicas com aplicações em segmentos diferentes, assim como uma variação no princípio de cada técnica (Schubert, 2023). As mais utilizadas na MA são aquelas baseadas em extrusão, como modelagem de deposição de filamentos (FDM/FFF), estereolitografia (SLA), e sinterização a laser seletiva por fusão em leito de pó (SLS) (Ryan et al., 2022; Ganguly, 2022). A Tabela 3 apresenta as principais vantagens e desvantagens das mencionadas.

**Tabela 3.** Comparação principais técnicas MA.

<b>Técnica</b>	<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
Estereolitografia (SLA)	Alta resolução, precisão, acabamento, tempo de impressão, excesso de material resultante da impressão é reutilizado.	Apenas os polímeros polimerizáveis por luz, um alto custo, prazo de validade limitado e risco por inalação e contato
Modelagem por Deposição de material Fundido (FDM)	Baixo custo de materiais e equipamentos, há uma diversidade de materiais termoplásticos e biocompósitos com fibras naturais	Boa resolução mas de qualidade inferior a SLA, apenas uso de termoplástico.
Sinterização seletiva a laser (SLS)	Melhor resistência ao calor, peças fabricadas com melhor resistência mecânica e a altas temperaturas e maior durabilidade.	Desperdício de materiais no processamento, necessita de infraestrutura, alto custo e risco por inalação

Fonte: Pereira, 2023; DePalma et al., 2020; Alcalde; Wiltgen, 2018; Loiola et al., 2018



Entre as técnicas apresentadas, a modelagem de deposição fundida (FDM) é uma das técnicas mais adotadas, devido ao seu funcionamento simplificado, não necessitando o uso de solventes e colas, por seu custo baixo e possuir um tamanho ideal para mesa (Zhao et al., 2016). Para Barbosa (2019) a impressora está entre as principais escolhas industriais em razão do seu custo, tanto da máquina quanto do material, facilidade na aprendizagem do seu uso, do suporte técnico e manutenção.

Como exposto previamente, a impressão FDM permite a inserção de biocompósitos, em especial, fibras lignocelulósicas como reforço de polímeros termoplásticos. Essa possibilidade se faz diretamente importante quando se considera a busca pela sustentabilidade nos mais diversos setores, impulsionada pela Agenda 2030, assim, levando a uma redução de matéria-prima derivada de fontes não renováveis. Esse aumento gradual ao longo dos anos, impulsionado por estímulos de busca por processos mais sustentáveis foi verificado e também pode ser associado ao crescimento da manufatura aditiva em novos setores, que seguiu uma alta a partir de 2020 (Germano; Mello; Motta, 2021).

A inserção de fibras naturais também pode estar associada a redução de resíduos vegetais, já que é possível a extração de fibras destes, levando-as a uma nova rota produtiva, reduzindo a disposição precoce em aterros ou em ambiente aberto desses materiais com potencial, como as fibras de coco, dendê, bananeira (Faradilla et al., 2022).

Além disso, foi possível avaliar que, apesar dos incentivos da Agenda 2030 e legislações acerca do gerenciamento dos resíduos, o Brasil ainda se encontra consideravelmente atrasado. Tanto em termos de tecnologia da Indústria 4.0, quanto em sustentabilidade.

Mesmo o Brasil sendo um país com uma vasta diversidade de resíduos classificados como fibras vegetais, verifica-se uma considerável escassez de estudos e tecnologias inserindo essas fibras em processos mais limpos e soluções de problemas ambientais.

A reutilização dos subprodutos gerados em quantidades consideráveis tornaria os processos mais ecoeficientes, seguindo os conceitos da Produção mais Limpa, além de compactuar com as metas do objetivo 12 da Agenda 2030 e a com a Política Nacional de Resíduos Sólidos.

## Conclusões

A geração excessiva de resíduos é uma preocupação atual que transcende legislações ambientais, diversos resíduos ainda possuem potencial uso para voltarem a cadeia produtiva, diminuindo a disposição inadequada. Assim, estudos visando a inclusão desses resíduos em forma de fibras naturais na impressão 3D se mostram relevantes.

Foi possível observar uma participação significativamente alta de estudos de revisão, devido a tecnologia de impressão 3D e a inserção de fibras ainda ser um processo considerado novo, com início dos estudos há menos de 10 anos, esse fator também explica um número baixo de artigos que propuseram uma aplicação para a impressão dentro dos setores produtivos.

Mas apesar desse resultado, foi possível observar um aumento ao longo dos anos de artigos, em especial, com a maior incidência do uso de fibras vegetais, com destaque para fibra de linho, arroz, juta, palma/dendê, bambu e coco. Podendo inferir então, as fibras mais utilizadas, demonstraram potencial para essas fibras vegetais dentro da indústria 4.0.

A contribuição dos países com estudos também foi um fator a ser estudado, sendo possível relacionar o aumento com o incentivo da tecnologia e a busca por matéria-prima renovável.



É possível identificar a significativa diferença entre os três países mais contribuintes em comparação aos outros países, especialmente o Brasil, apesar de uma legislação atual sobre resíduos. Além disso, em escala mundial, observa-se essa lacuna do não cumprimento das metas propostas ao Objetivo 12 em relação a redução e reutilização dos resíduos gerados.

Dessa forma, se faz necessário mais estudos com o reuso de fibras vegetais com potencial para diversas atividades, especialmente atividades com avanços tecnológicos da Indústria 4.0, em que o Brasil ainda se depara com um atraso.

## Referências

- ABRELPE. Associação brasileira de empresas de limpeza pública e resíduos especiais [database on the Internet]. 2021. Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2021.
- Ahmad MN, Ishak MR, Taha MM, Mustapha F, Leman Z 2021. Rheological and Morphological Properties of Oil Palm Fiber-Reinforced Thermoplastic Composites for Fused Deposition Modeling (FDM). *Polymers* 13(21): 3739.
- Aida HJ, Nadlene R, Mastura MT, Yusriah L, Sivakumar D, Ilyas RA 2021. Natural fibre filament for Fused Deposition Modelling (FDM): A review. *International Journal of Sustainable Engineering* 14(6): 1988-2008.
- Alcaide E, Wiltgen F 2018. Estudo das tecnologias em prototipagem rápida: passado, presente e futuro. *Revista Ciências Exatas*, 24(2): 12-20.
- Alfaia RGDSM, Costa AM, Campos JC 2017. Municipal solid waste in Brazil: A review. *Waste Management & Research* 35(12): 1195-1209.
- Almeida RG, Neumann M, Sanches SLR 2018. O que é evidenciado no Brasil sobre a Responsabilidade Social Corporativa advinda da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) nos Formulários de Referência e Relatos Integrados? *Sociedade, Contabilidade e Gestão* 13(3).
- Alves DA, Araújo GC 2018. Percepção Ambiental de discentes sobre o uso de sacolas plásticas. *Desenvolve Revista de Gestão do Unilasalle* 7(1): 55-68.
- Anandkumar R, Ramesh Babu S, Sathyamurthy R 2021. Investigations on the mechanical properties of natural fiber granulated composite using hybrid additive manufacturing: a novel approach. *Advances in Materials Science and Engineering* 2021.
- Archela RS, Archela E 2006. Webquest com orientações para a construção de mapas temáticos. *Geografia* 15(2): 129-141.
- Armani TE, Torres JRP, Krauspenhar I 2011. Resíduo: problema ambiental, social, cultural, político, econômico, educacional e industrial. *Revista Cultivando o Saber* 4(2): 25-45.
- Arockiam AJ, Subramanian K, Padmanabhan RG, Selvaraj R, Bagal DK, Rajesh S 2021. A review on PLA with different fillers used as a filament in 3D printing. *Materials Today: Proceedings* 50(5): 2057-2064.



- Balla VK, Kate KH, Satyavolu J, Singh P, Tadimetri JGD 2019. Additive manufacturing of natural fiber reinforced polymer composites: Processing and prospects. *Composites Part B: Engineering* 174: 106956.
- Balla VK, Tadimetri JGD, Kate KH, Satyavolu J 2020. 3D printing of modified soybean hull fiber/polymer composites. *Materials Chemistry and Physics* 254: 123452.
- Barbosa PVO 2019. *Desafios das pequenas empresas para a inclusão da manufatura aditiva no contexto da Indústria 4.0*. Trabalho, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 74pp.
- Beckman IP, Lozano C, Freeman E, Riveros G 2021. Fiber selection for reinforced additive manufacturing. *Polymers* 13(14): 2231.
- Bento SC, Melo Conti D, Baptista RM, Ghobril CN 2018. As novas diretrizes e a importância do planejamento urbano para o desenvolvimento de cidades sustentáveis. *Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade* 7(3): 469-488.
- Bezerra CR, Campos KFS 2019. Avaliação da gestão e composição gravimétrica dos resíduos sólidos domiciliares do município de Manaíra–PB. *InterEspaço: Revista de Geografia e Interdisciplinaridade* 5(16): 10610.
- Bhagia S, Bornani K, Agrawal R, Satlewal A, Đurkovič J, Lagaña R, Ragauskas AJ 2021. Critical review of FDM 3D printing of PLA biocomposites filled with biomass resources, characterization, biodegradability, upcycling and opportunities for biorefineries. *Applied Materials Today* 24: 101078.
- Bhatia A, Sehgal AK 2021. Additive manufacturing materials, methods and applications: A review. *Materials Today: Proceedings* 2021.
- Blok LG, Longana ML, Yu H, Woods BK 2018. An investigation into 3D printing of fibre reinforced thermoplastic composites. *Additive Manufacturing* 22, 176-186.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA). 2012. Plano Nacional de Resíduos Sólidos. Brasília. 103 p.
- Calì M, Pascoletti G, Gaeta M, Milazzo G, Ambu R 2020. A new generation of bio-composite thermoplastic filaments for a more sustainable design of parts manufactured by FDM. *Applied Sciences* 10(17): 5852.
- Cano-Vicent A, Tambuwala MM, Hassan SS, Barh D, Aljabali AA, Birkett M, Serrano-Aroca A 2021. Fused deposition modelling: Current status, methodology, applications and future prospects. *Additive Manufacturing* 47: 102378.
- Carvalho VG, Estender AC 2017. Conscientização ambiental contribuindo para eliminar o desperdício e ampliar as ações a favor do meio ambiente. *Revista Desafios* 4(2): 150-166.
- CNTL. Centro Nacional de Tecnologias Limpas [database on the Internet]. 2003. Questões Ambientais e Produção mais limpa. Série Manuais de Produção mais Limpa, Porto Alegre.
- Coppola B, Garofalo E, Di Maio L, Scarfato P, Incarnato, L 2018. Investigation on the Use of PLA/hemp Composites for the Fused Deposition modelling (FDM) 3D Printing. *AIP Conference Proceedings* 1–5.



- Costa NP, Prado Filho JF, Fonseca A 2017. Cleaner production implementation in the textile sector: The case of a medium-sized industry in Minas Gerais. *Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental* 21(3): 222-231.
- Daminabo SC, Goel S, Grammatikos SA, Nezhad HY, Thakur VK 2020. Fused deposition modeling-based additive manufacturing (3D printing): techniques for polymer material systems. *Materials today chemistry* 16: 100248.
- Deb D, Jafferson JM 2021. Natural fibers reinforced FDM 3D printing filaments. *Materials Today: Proceedings* 46(2): 1308-1318.
- DePalma K, Walluk MR, Murtaugh A, Hilton J, McConky S, Hilton B 2020. Assessment of 3D printing using fused deposition modeling and selective laser sintering for a circular economy. *Journal of Cleaner Production*, 264: 121567.
- Depuydt D, Balthazar M, Hendrickx K, Six W, Ferraris E, Desplentere F, Van Vuure AW 2019. Production and characterization of bamboo and flax fiber reinforced polylactic acid filaments for fused deposition modeling (FDM). *Polymer composites* 40(5): 1951-1963.
- Deus RM, Mele FD, Bezerra BS, Battistelle RAG 2020. A municipal solid waste indicator for environmental impact: Assessment and identification of best management practices. *Journal of Cleaner Production* 242: 118433.
- Dilberoglu UM, Gharehpapagh B, Yaman U, Dolen M 2017. The role of additive manufacturing in the era of industry 4.0. *Procedia Manufacturing* 11: 545-554.
- Faradilla RF, Tamrin TAM, Rejeki S, Rahmi A, Arcot J 2022. Low energy and solvent free technique for the development of nanocellulose based bioplastic from banana pseudostem juice. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*, 4: 100261.
- Faruk O, Bledzki AK, Fink HP, Sain M 2012. Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010. *Progress in polymer science* 37(11), 1552-1596.
- Fico D, Rizzo D, Casciaro R, Esposito Corcione C 2022. A review of polymer-based materials for Fused Filament Fabrication (FFF): Focus on sustainability and recycled materials. *Polymers* 14(3): 465.
- Figueiredo FF 2018. A agenda político-ambiental no Brasil. *Revista Espaço Acadêmico* 18(205): 106-115.
- Figuerola-Velarde V, Diaz-Vidal T, Cisneros-López EO, Robledo-Ortiz JR, López-Naranjo EJ, Ortega-Gudiño P, Rosales-Rivera LC 2021. Mechanical and physicochemical properties of 3d-printed agave fibers/poly (Lactic acid) biocomposites. *Materials* 14(11): 3111.
- Fouladi MH, Namasivayam SN, Sekar V, Marappan P, Choo HL, Ong TK, Baniotopoulos C 2020. Pretreatment studies and characterization of bio-degradable and 3d-printable filaments from coconut waste. *International Journal of Nanoelectronics and Materials* 13(Special Issue): 137-148.
- Franco-Urquiza EA, Escamilla CR, Alcántara PI. 2022. 3D printing on jute fabrics. *Afinidad* 79(595): 231-236.



- Franco-Urquiza EA, Escamilla YR, Alcántara Llanas PI. 2021. Characterization of 3D printing on jute fabrics. *Polymers* 13(19): 3202.
- Galvão TF, Pansani TDSA, Harrad D 2015. Principais itens para relatar Revisões sistemáticas e Meta-análises: A recomendação PRISMA. *Epidemiologia e serviços de saúde*, 24: 335-342.
- Ganguly A, Shankar S, Das A, Shukla M, Swaroop C, Bhardwaj T 2022. Natural fibre reinforced composites: A review based on additive manufacturing routes and biodegradability perspective. *Materials Today: Proceedings* 62(1): 131-135.
- Ganguly A, Shankar S, Das A, Shukla M, Swaroop C, Bhardwaj T 2022. Natural fibre reinforced composites: A review based on additive manufacturing routes and biodegradability perspective. *Materials Today: Proceedings*, 62: 131-135.
- Ganguly A, Shankar S, Das A, Shukla M, Swaroop C, Bhardwaj T (2022). Natural fibre reinforced composites: A review based on additive manufacturing routes and biodegradability perspective. *Materials Today: Proceedings*, 62, 131-135.
- George J, Sreekala MS, Thomas S 2001. A review on interface modification and characterization of natural fiber reinforced plastic composites. *Polymer Engineering & Science* 41(9) 1471-1485.
- Germano AXDS, Mello JAVB, Motta WH 2021. Contribuição das tecnologias da indústria 4.0 para a sustentabilidade: uma revisão sistemática. *Palavra clave* 11(1): 142-142.
- Ghobakhloo M 2020. Industry 4.0, digitization, and opportunities for sustainability. *Journal of cleaner production* 252: 119869.
- Gholampour A, Ozbakkaloglu T 2020. A review of natural fiber composites: Properties, modification and processing techniques, characterization, applications. *Journal of Materials Science* 55(3), 829-892.
- Gouveia N 2012. Resíduos sólidos urbanos: impactos socioambientais e perspectiva de manejo sustentável com inclusão social. *Ciência & saúde coletiva* 17(6): 1503-1510.
- Guo N, Leu MC 2013. Additive manufacturing: technology, applications and research needs. *Frontiers of mechanical engineering*, 8: 215-243.
- Ho MP, Wang H, Lee JH, Ho CK, Lau KT, Leng J, Hui D 2012. Critical factors on manufacturing processes of natural fibre composites. *Composites Part B: Engineering* 43(8), 3549-3562.
- Ilyas RA, Sapuan SM, Harussani MM, Hakimi MYAY, Haziq MZM, Atikah MSN, Asrofi M 2021. Polylactic acid (PLA) biocomposite: Processing, additive manufacturing and advanced applications. *Polymers* 13(8): 1326.
- Inácio D, Drozda FO, Assis Silva W, Marques MAM, Seleme R 2020. A importância da manufatura aditiva como tecnologia digital para a indústria 4.0: uma revisão sistemática. *Revista Competitividade e Sustentabilidade* 7(3): 653-667.



- Joshi SV, Drzal LT, Mohanty AK, Arora S 2004. Are natural fiber composites environmentally superior to glass fiber reinforced composites? *Composites Part A: Applied science and manufacturing* 35(3), 371-376.
- Le Duigou A, Barbé A, Guillou E, Castro M 2019. 3D printing of continuous flax fibre reinforced biocomposites for structural applications. *Materials & Design* 180 (15): 107884.
- Le Duigou A, Castro M, Bevan R, Martin N 2016. 3D printing of wood fibre biocomposites: From mechanical to actuation functionality. *Materials & Design* 96, 106-114.
- Le Duigou A, Correa D, Ueda M, Matsuzaki R, Castro M 2020. A review of 3D and 4D printing of natural fibre biocomposites. *Materials & Design* 194: 108911.
- Li X, Tabil LG, Panigrahi S 2007. Chemical treatments of natural fiber for use in natural fiber-reinforced composites: a review. *Journal of Polymers and the Environment* 15(1): 25-33.
- Loiola M, Shibasaki WMM, Lima L, Seixas MC, Ribeiro S, Poleti TM, Cotrim-Ferreira F 2018. Impressão 3D: materializando o virtual. *Ortodontia.SPO*, 51(3): 344-9.
- Maiello A, Britto ALNDP, Valle TF 2018. Implementação da política nacional de resíduos sólidos. *Revista de Administração Pública* 52(1): 24-51.
- Matsuzaki R, Ueda M, Namiki M, Jeong TK, Asahara H, Horiguchi K, Hirano Y 2016. Three-dimensional printing of continuous-fiber composites by in-nozzle impregnation. *Scientific reports* 6(1), 1-7.
- Mazzanti V, Malagutti L, Mollica F 2019. FDM 3D printing of polymers containing natural fillers: A review of their mechanical properties. *Polymers* 11(7): 1094.
- Milosevic M, Stoof D, Pickering KL 2017. Characterizing the mechanical properties of fused deposition modelling natural fiber recycled polypropylene composites. *Journal of Composites Science* 1(1): 7.
- Mohanty AK, Misra MA, Hinrichsen GI 2000. Biofibres, biodegradable polymers and biocomposites: An overview. *Macromolecular materials and Engineering* 276(1), 1-24.
- Morales MA, Atencio Martinez CL, Maranon A, Hernandez C, Michaud V, Porras A 2021. Development and characterization of rice husk and recycled polypropylene composite filaments for 3D printing. *Polymers* 13(7): 1067.
- MOURA AMM 2016. Trajetória da Política Ambiental Federal no Brasil. In: MOURA, A.M.M. (org.). Governança ambiental no Brasil: instituições, atores e políticas públicas. Brasília: IPEA. p. 13-44.
- Nações Unidas Brasil [database on the Internet]. Objetivos de Desenvolvimento Sustentável no Brasil. 2016. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>
- Ngo TD, Kashani A, Imbalzano G, Nguyen KT, Hui D 2018. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications, and challenges. *Composites Part B: Engineering* 143, 172-196.



- Ning F, Cong W, Hu Y, Wang H 2017. Additive manufacturing of carbon fiber-reinforced plastic composites using fused deposition modeling: Effects of process parameters on tensile properties. *Journal of composite materials* 51(4), 451-462.
- Ning F, Cong W, Qiu J, Wei J, Wang S. 2015. Additive manufacturing of carbon fiber reinforced thermoplastic composites using fused deposition modeling. *Composites Part B: Engineering* 80, 369-378.
- Oliveira LD 2013. Da Eco-92 à Rio+ 20: uma breve avaliação de duas décadas. *Boletim Campineiro de Geografia* 2(3): 479-499.
- Oliveira LM, Pereira GR 2017. Produção Mais Limpa em Empresas de Gaspar/SC: um estudo de caso. *HOLOS* 7: 168-182.
- ONU [database on the Internet]. Global State of Metropolis 2020 – Population Data Booklet. 2020. Disponível em: <https://unhabitat.org/global-state-of-metropolis-2020-%E2%80%93-population-data-booklet>
- Page MJ. et al 2023. A declaração PRISMA 2020: diretriz atualizada para relatar revisões sistemáticas. *Revista Panamericana de Salud Pública*, 46: e112.
- Parandoush P, Lin D 2017. A review on additive manufacturing of polymer-fiber composites. *Composite Structures* 182, 36-53.
- Pereira A, Oliveira E 2018. Indústria 4.0: conceitos e perspectivas para o Brasil. *Revista da Universidade Vale do Rio Verde* 16(1).
- Pereira AFR 2023. *Análise da resistência mecânica de corpos de provas produzidos por impressão 3D com diferentes parâmetros utilizando o termoplástico PLA*. Trabalho, Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 52pp.
- Perez AR, Roberson DA, Wicker RB 2014. Fracture surface analysis of 3D-printed tensile specimens of novel ABS-based materials. *Journal of Failure Analysis and Prevention* 14(3), 343-353.
- Pickering KL, Efendy MA, Le TM 2016. A review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical performance. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 83: 98-112.
- Pinto MA 2022. *Métodos de nesting e programação em fabricação aditiva: revisão bibliométrica e sistemática da literatura*. Tese de Doutorado, Universidade de Coimbra.
- Pott CM, Estrela CC 2017. Histórico ambiental: desastres ambientais e o despertar de um novo pensamento. *Estudos avançados* 31: 271-283.
- Rajeshkumar G, Seshadri SA, Devnani GL, Sanjay MR, Siengchin S, Maran JP, Anuf AR 2021. Environment friendly, renewable, and sustainable poly lactic acid (PLA) based natural fiber reinforced composites—A comprehensive review. *Journal of Cleaner Production* 310: 127483.
- Ramos APM, Junior JM, Decanini MMS, Pugliesi EA, Oliveira RF, Paranhos AC 2016. Avaliação qualitativa e quantitativa de métodos de classificação de dados para o mapeamento coroplético. *Revista Brasileira de Cartografia* 68(3): 609-629.



- Rensi F, Schenini PC 2006. Produção mais limpa. *Ciências da Administração* 8(16):5.
- Ribeiro AR 2007. Práticas educativas ambientais em Alto do Rodrigues (RN): uma análise do programa de educação ambiental da Petrobras. *Série justiça e desenvolvimento* 5513, 27.
- Rodrigues VP, Senzi Zancul E, Mançaneres CG, Giordano CM, Salerno MS 2017. Manufatura aditiva: estado da arte e framework de aplicações. *Revista Gestão da Produção Operações e Sistemas*, 12(3): 1-1.
- Royan NR, Leong JS, Chan WN, Tan JR, Shamsuddin ZSB 2021. Current state and challenges of natural fibre-reinforced polymer composites as feeder in fdm-based 3d printing. *Polymers* 13(14): 2289.
- Ryan KR, Down MP, Hurst NJ, Keefe EM, Banks CE 2022. Additive manufacturing (3D printing) of electrically conductive polymers and polymer nanocomposites and their applications. *eScience*, 2(4): 365-381.
- Sanches BC, Carvalho ES, Gomes FFB 2019. A Indústria 4.0 e suas contribuições à sustentabilidade. *Revista Engenharia e Tecnologia Aplicada-UNG-Ser* 2(1): 48-55.
- Santos JG, Carneiro VCV, Ramalho ÂMC 2015. Sustentabilidade e produção mais limpas: um estudo sobre as implicações na vantagem competitiva empresarial. *Revista Metropolitana de Sustentabilidade* 5(2): 34-48.
- Santos JG, Silva YDT 2017. Práticas de gestão ambiental e produção mais limpa: uma análise do processo produtivo da Cachaça Sanhaçu. *Revista Produção e Desenvolvimento* 3(3): 1-17.
- Santos LM, Rocha DSGM, Carneiro ML, Luz MP 2018. Tipos de polímeros utilizados como matéria-prima no método de manufatura aditiva por FDM: uma abordagem conceitual. In *XXXVIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção*. A engenharia de produção e suas contribuições para o desenvolvimento do Brasil. Maceió.
- Santos LMAL, Costa MB, Kothe JV, Benitez GB, Schaefer JL, Baierle IC, Nara EOB 2020. Industry 4.0 collaborative networks for industrial performance. *Journal of Manufacturing Technology Management* 32(2):245-265.
- Saran OS, Reddy AP, Chaturya L, Kumar MP 2022. 3D printing of composite materials: A short review. *Materials Today: Proceedings*, 64(1):615-619.
- Sathasivam KV, Haris MRHM, Fuloria S, Fuloria NK, Malviya R, Subramaniyan V 2021. Chemical modification of banana trunk fibers for the production of green composites. *Polymers* 13(12): 1943.
- Shahinur S, Sayeed MA, Hasan M, Sayem ASM, Haider J, Ura S 2022. Current development and future perspective on natural jute fibers and their biocomposites. *Polymers* 14(7): 1445.
- Shanmugam V, Rajendran DJJ, Babu K, Rajendran S, Veerasimman A, Marimuthu U, Ramakrishna S 2021. The mechanical testing and performance analysis of polymer-fibre composites prepared through the additive manufacturing. *Polymer testing* 93: 106925.
- Silva ALE, Moraes JAR, Guterres LL, Burin HP 2017. Contribuições da produção mais limpa, ecoeficiência e sustentabilidade como alternativas de agregação de valor para uma cooperativa de materiais reciclados. *Desafio Online* 5(2): 242-260.



- Silva RCPD, Costa ARS, El-Deir SG, Jucá JFT 2020. Setorização de rotas de coleta de resíduos sólidos domiciliares por técnicas multivariadas: estudo de caso da cidade do Recife, Brasil. *Engenharia Sanitária e Ambiental* 25: 821-832.
- Silva SM, Antunes T, Costa MEV, Oliveira JM 2020. Cork-like filaments for Additive Manufacturing. *Additive Manufacturing* 34: 101229.
- Silva TF, Bassotto LC 2021. O Estado e a questão ambiental: Contribuições da legislação ambiental brasileira com o meio ambiente. *Planeta Amazônia: Revista Internacional de Direito Ambiental e Políticas Públicas* (12): 135-141.
- Sousa CAF, Campos JCB, Oliveira BM 2016. Panorama do gerenciamento dos Resíduos Sólidos no Brasil e no Nordeste após a implementação do PNRS. *Revista Científica ANAP Brasil* 9(15):39-50.
- Stoof D, Pickering K 2018. Sustainable composite fused deposition modelling filament using recycled pre-consumer polypropylene. *Composites Part B: Engineering* 135: 110-118.
- Stoof D, Pickering K, Zhang Y 2017. Fused deposition modelling of natural fibre/polylactic acid composites. *Journal of Composites Science* 1(1): 8.
- Suteja J, Firmanto H, Soesanti A, Christian C 2020. Properties investigation of 3D printed continuous pineapple leaf fiber-reinforced PLA composite. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 35(11): 2052–2061.
- Tao Y, Wang H, Li Z, Li P, Shi SQ 2017. Development and application of wood floor-filled polylactic acid composite filament for 3D printing. *Materials* 10(4), 339.
- Tekinalp HL et al 2014. Highly oriented carbon fiber–polymer composites via additive manufacturing. *Composites Science and Technology* 105: 144-150.
- Tian X et al. 2016. Interface and performance of 3D printed continuous carbon fiber reinforced PLA composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 88:198-205.
- Wang Q, Ji C, Sun L, Sun J, Liu J 2020. Cellulose nanofibrils filled poly (lactic acid) biocomposite filament for FDM 3D printing. *Molecules* 25(10): 2319.
- Wang X, Jiang M, Zhou Z, Gou J, Hui D 2017. 3D printing of polymer matrix composites: A review and prospective. *Composites Part B: Engineering* 110: 442-458.
- Wang Z, Xu Y, Liu R, Zhu X 2022. The 3D-Printing-Accelerated Design for a Biodegradable Respirator from Tree Leaves (TRespirator). *Polymers* 14(9): 1681.
- Yong JY, Klemeš JJ, Varbanov PS, Huisingh D 2016. Cleaner energy for cleaner production: modelling, simulation, optimisation and waste management. *Journal of Cleaner Production* 111(A): 1-16.
- Zago VCP, Barros RTDV 2019. Gestão dos resíduos sólidos orgânicos urbanos no Brasil: do ordenamento jurídico à realidade. *Engenharia Sanitária e Ambiental* 24(2): 219-228.



Zhao DX, Cai X, Shou GZ, Gu YQ, Wang PX 2016. Study on the preparation of bamboo plastic composite intend for additive manufacturing. *Key engineering materials*, 667: 250-258.

Zhong W, Li F, Zhang Z, Song L, Li Z 2001. Short fiber reinforced composites for fused deposition modeling. *Materials Science and Engineering: A* 301(2): 125-130.