

Implementação de impressora 3D para fabricação de peças sobressalentes (spare parts)

Maria Elisa Rodrigues da Silva¹; 0009-0006-0073-3580
Maria Luísa Rodrigues da Silva¹; 0009-0008-6559-6622
Felipe de Almeida Gomes¹; 0009-0000-1208-0552
Francisco Sabbadini^{1,2}; 0000-0001-5303-9409

1 – UFF, Universidade Federal fluminense, Volta Redonda, RJ.

ma_elisa@id.uff.br

3- UERJ- Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Resende, RJ.

franciscosabbadini@fat.uerj.br

Resumo: Esta pesquisa avaliou a evolução da temática acerca da impressão 3D. A manufatura aditiva surge como alternativa inovadora para aumentar a agilidade, flexibilidade e eficiência, reduzindo custos de estoque, minimizando o tempo de espera, viabilizando produção sob demanda e permitindo personalização conforme necessidades específicas. Conectada à Indústria 4.0 e à economia circular, a tecnologia favorece processos inteligentes, sustentáveis e interconectados, aproveitando recursos, prolongando o ciclo de vida de produtos, promovendo reutilização e remanufatura, e fortalecendo modelos de negócios circulares. Apesar dos avanços, ainda existem desafios quanto à seleção de peças, desempenho e durabilidade, disponibilidade de materiais e regulamentações. Espera-se que os resultados desta pesquisa contribuam para o desenvolvimento de práticas mais eficientes e sustentáveis na indústria automotiva, promovendo inovação, competitividade e redução de impactos ambientais.

Palavras-chave: Impressão 3D. Manufatura aditiva. Indústria 4.0. Economia circular. Manutenção industrial.

INTRODUÇÃO

A presente pesquisa tem como objetivo realizar avaliação a respeito da evolução da manufatura aditiva no contexto da indústria 4.0 e da Economia Circular (EC). A impressão 3D surgiu como uma alternativa pioneira na transformação do processo produtivo, favorecendo uma maior agilidade, flexibilidade e eficiência. Sua adoção pode reduzir custos referentes ao estoque de peças, além de minimizar o tempo de espera, contribuir para a diminuição de desperdícios e consequentemente viabilizar a produção sob demanda, além de permitir a personalização de acordo com as especificidades da manutenção (NASCIMENTO et al., 2018).

Entre os principais benefícios da manufatura aditiva, destacam-se a redução do tempo de fabricação, a eliminação da necessidade de moldes e ferramentas convencionais, bem como a possibilidade de produção de baixo volume com alta precisão, sem grandes investimentos em infraestrutura tradicional. Tais características tornam a impressão 3D uma tecnologia estratégica para otimizar a gestão de peças sobressalentes (IVANOV; DOLGUI; SOKOLOV, 2018; TAVALENNON OLSEN; TOMLIN, 2018).

Essa inovação também está ligada à Indústria 4.0, marcada pela integração de sistemas digitais, conectividade e automação, potencializando a criação de processos que se caracterizam por apresentarem maior inteligência e sustentabilidade (ROSIN et al., 2017). Diante do contexto apresentado, a impressão 3D não apenas contribui para maior eficiência produtiva, mas também gera suporte a práticas alinhadas ao conceito de economia circular (NASCIMENTO et al., 2019).

A economia circular pode ser compreendida como um modelo econômico que busca a redução do desperdício e maximização do uso dos recursos, substituindo o tradicional ciclo linear de “extrair, produzir e descartar” por um sistema em que os materiais e produtos são constantemente reutilizados, reciclados e regenerados (DESPEISSE et al., 2017). Lewandowski (2016) destaca que esse modelo é baseado em princípios, de acordo com o Quadro 1, que buscam orientar os padrões de produção e consumo, a fim de priorizar a regeneração de recursos, a gestão sustentável de estoques finitos e a criação de valor equilibrado nas dimensões econômica, ambiental e social. Deste modo, a integração entre impressão 3D, Indústria 4.0 e economia circular viabiliza uma maior ponderação no que diz respeito a processos produtivos, promovendo sustentabilidade, inovação contínua e



possibilitando maior competitividade no setor automotivo (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2013).

Quadro 1 – Princípios da Economia Circular

Princípios	Descrição
P1 - Regenerar o capital natural e a gestão do estoque finito de recursos	Projetar produtos que renovem os recursos naturais e utilizem materiais de forma responsável, com foco na regeneração e não no esgotamento.
P2 - Otimização, aproveitando o máximo de valor	Maximizar o valor dos materiais ao longo do tempo, garantindo sua durabilidade, reparabilidade e reutilização.
P3 - Não gerar externalidades negativas	Eliminar resíduos e poluição, garantindo que os processos e produtos não causem danos ao meio ambiente ou à saúde.

Fonte: Elaborado com base em Ellen MacArthur Foundation, 2013, p. 13.

Diante disso, o objetivo do presente estudo foi de analisar a evolução da Manufatura Aditiva e de que forma a utilização de impressoras 3D impacta a fabricação de peças sobressalentes na indústria automotiva, especialmente no que se refere à eficiência do processo produtivo. Isso envolve compreender como essa tecnologia pode otimizar tempo, reduzir custos e tornar a manutenção mais ágil e flexível (CHEN et al., 2015).

MÉTODOS

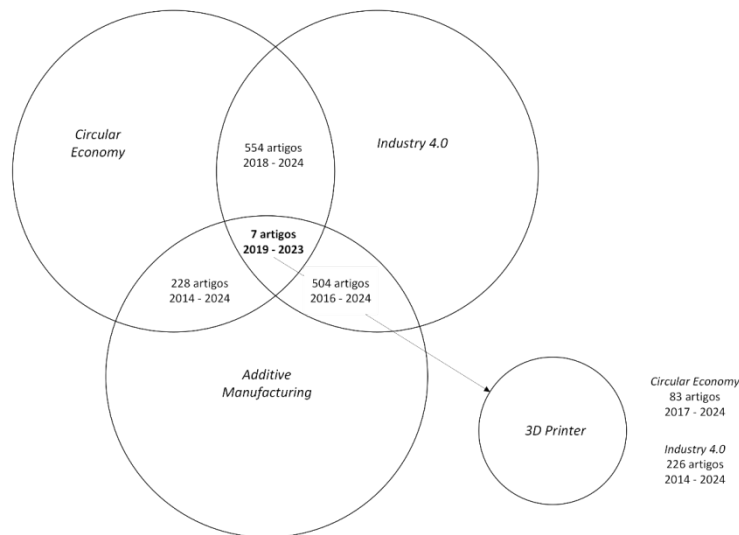
A abordagem metodológica deste estudo foi a de uma análise bibliométrica, reconhecida por possibilitar de forma sistemática de organizar, mapear e interpretar grandes volumes de informações científicas (DONTHU et al., 2021). Para a coleta de dados, utilizou-se a base Scopus, devido à sua ampla cobertura multidisciplinar e relevância internacional (BURNHAM, 2006; FALAGAS et al., 2008). As buscas contemplaram as palavras-chave Circular Economy, Industry 4.0, Additive Manufacturing e 3D Printer, em diferentes combinações, abrangendo tanto estudos isolados quanto aqueles que se encontram na interseção dos temas (ZHANG; WANG, 2022). O recorte temporal foi definido entre 2014 e 2024, cobrindo um período de busca de 11 anos. Apenas artigos em inglês, revisados por pares, foram incluídos no levantamento para assegurar a qualidade e uniformidade da análise (KITCHENHAM et al., 2009).

Os dados foram gerenciados no software EndNote, que possibilitou a classificação e a exclusão de duplicatas, reduzindo o total inicial de 1.602 artigos para 1.337 publicações válidas (PETERSEN et al., 2015). Foram considerados apenas os estudos que abordavam de forma direta a relação entre “Circular Economy” e “Industry 4.0”, “Circular Economy” e



“Additive Manufacturing” ou “Industry 4.0” e “Additive Manufacturing”, descartando os demais (TRANFIELD; DENYER; SMART, 2003). Além disso, identificaram-se 83 artigos sobre Economia Circular (2017–2024) e 226 sobre Indústria 4.0 (2014–2024), evidenciando o crescimento do interesse científico nessas áreas. Entre os resultados obtidos, foram identificados 7 artigos que relacionam simultaneamente os três temas, em que a manufatura aditiva, Economia Circular e Indústria 4.0

Figura 1: Filtros de seleção de artigos.



Para essa etapa, utilizou-se a plataforma online Vennage, que possibilitou a visualização das palavras-chave mais frequentes nos sete artigos principais, oferecendo insights relevantes para a compreensão das tendências emergentes e dos tópicos de maior relevância científica.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise dos resultados decorrentes da busca na base Scopus mostrou levantamento um crescimento expressivo ao longo do período de 2014 a 2024, vide Quadro 1, com 1343 publicações no total.

Quadro 1 – Evolução das publicações por ano

Ano	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Publicações	2	1	4	5	44	59	138	195	277	307	311
Varição relativa %	0	-50	300	25	780	34,09	133,9	41,30	42,5	10,83	1,3
Publicações (Acumulado)	2	3	7	12	56	115	253	448	725	1032	1343
Varição acumulada %	0,1	0,2	0,5	0,9	4,2	8,6	18,8	33,4	53,9	76,8	100

Fonte: Scopus, 2024. Elaboração pelos autores à partir de dados compilados

Foram observados, um de 2017 para 2018 (780%) e outro de 2019 para 2020 (139%), mantendo propensão de crescimento depois apresentando uma estagnação a partir de 2023. Evidencia-se então momentos em que o interesse pelo tema se tornou mais intenso. A tendência de crescimento no número de publicações mostra um aumento no interesse em pesquisas relacionadas com o tema da manufatura aditiva no contexto da indústria 4.0 e da Economia Circular. Observou-se que a impressão 3D foi tema habitual nos artigos analisados, evidenciando seu papel como tecnologia central de convergência entre EC e I4.0.

A análise bibliométrica envolveu tanto avaliações quantitativas, como número de publicações por ano, distribuição da produção por países, áreas de conhecimento e instituições, quanto qualitativas, no caso de pontos específicos identificados na leitura dos artigos selecionados. A partir das palavras-chave coletadas e selecionadas, foi gerada uma nuvem de palavras, ferramenta que busca facilitar a visualização, de forma rápida dos termos com maior recorrência nos artigos selecionados para análise (HEIMERL et al., 2014; CHEN et al., 2020), propiciando uma melhor compreensão do contexto envolvendo o objeto da pesquisa. Para tal, foi utilizada a plataforma online Venngage, conforme ilustrado na Figura 2, oferecendo insights significativos para a compreensão das tendências emergentes e dos tópicos de maior relevância científica.

Figura 2: Nuvem de Palavras



Fonte: Elaborado pelos autores.

Os resultados indicam que os termos Manufatura Aditiva e Impressão 3D com destaque, juntamente de temas como “manufatura aditiva de arco de arame”, “Plataforma de impressão 3D” e Recuperação de resíduos de impressão 3D”, indicando a MA como campo de interesse em pesquisa.

Embora tenha sido feita a identificação dos avanços, ainda existem lacunas para a adoção plena da tecnologia, como por exemplo a falta de modelos de decisão robustos para seleção de peças impressas em 3D, análises comparativas de desempenho e qualidade diante de processos convencionais, limitação relacionadas a materiais e barreiras normativas em setores como o automotivo e aeronáutico (Sun et al., 2020; Díaz-Perete et al., 2023). Os desafios citados aumentam a necessidade de incentivo a novas pesquisas, principalmente ligadas à integração da manufatura aditiva com cadeias de suprimentos digitais e Indústria 4.0, a fim de consolidar o seu papel na promoção de modelos circulares que sejam sustentáveis (Laskurain-Iturbe et al., 2021; Nascimento et al., 2022), assim como sugerem a realização de análises quantitativas e de tendência observadas no desenvolvimento do presente estudo.

CONCLUSÕES

Diante da pesquisa realizada a respeito da evolução da manufatura aditiva, constatou-se que a aplicação de impressoras 3D, de modo geral, e em específico na fabricação de peças sobressalentes apresenta importante potencial, em particular no setor automotivo,

mas ainda enfrenta desafios consideráveis. Destaca-se entre os desafios a ausência de modelos de decisão claros para seleção de peças com base em critérios técnicos e econômicos, a falta de análises quantitativas sobre desempenho e durabilidade em comparação com métodos convencionais, a limitação de materiais adequados e a necessidade de integração com cadeias de suprimentos digitais e ambientes de Indústria 4.0. As oportunidades identificadas como gaps para futuras pesquisas incluem o desenvolvimento de modelos de decisão estratégicos, materiais mais resistentes e sustentáveis, certificação e normas internacionais, e integração com fábricas inteligentes e cadeias de suprimentos digitais, permitindo produção sob demanda, automação e rastreabilidade.

REFERÊNCIAS

BURNHAM, J. F. Scopus database: a review. *Biomedical Digital Libraries*, 2006.

CHEN, D.; HEYER, S.; IBBOTSON, S.; SALONITIS, K.; STEINGRÍMSSON, J. G.; THIEDE, S. Direct digital manufacturing: Definition, evolution, and sustainability implications. *Journal of Cleaner Production*, v. 107, p. 615–625, 2015.

CHEN, D. et al. (2020). Referência implícita em: visualização de palavras-chave por nuvem. *Journal of Cleaner Production*.

DESPEISSE, M.; BAUMERS, M.; BROWN, P.; CHARNLEY, F.; FORD, S. J.; GARMULEWICZ, A.; KNOWLES, S.; MINSHALL, T. H. W.; MORTARA, L.; REED-TSOCHAS, F. P.; ROWLEY, J. Unlocking value for a circular economy through 3D printing: A research agenda. *Technological Forecasting and Social Change*, 2017.

DÍAZ-PERETE, D.; HERMOSO-ORZÁEZ, M. J.; CARMO-CALADO, L.; MARTÍN-DOÑATE, C.; TERRADOS-CEPEDA, J. Energy Recovery from Polymeric 3D Printing Waste and Olive Pomace Mixtures via Thermal Gasification—Effect of Temperature. *Polymers*, v. 15, n. 4, p. 918, 2023.

DONTHU, N.; KUMAR, S.; MUKHERJEE, D.; PANDEY, N.; LIM, W. M. How to conduct a bibliometric analysis: An overview and guidelines. *Journal of Business Research*, v. 133, p. 285–296, 2021.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. *Towards the circular economy. Journal of Industrial Ecology*, 2013, p. 13.

FALAGAS, M. E.; POURMOHAMED, K.; KAKLAMANOS, I.; PAPPAS, G. Comparison of PubMed, Scopus, Web of Science, and Google Scholar. *FASEB Journal*, 2008.



HEIMERL, F.; KOCH, S.; PERNUL, G.; ERLACHER, D. Word Cloud Explorer: Text Analytics Based on Word Clouds. *2014 IEEE Pacific Visualization Symposium (PacificVis)*, 2014.

IVANOV, D.; DOLGUI, A.; SOKOLOV, B. The impact of digital technology and Industry 4.0 on the ripple effect and supply chain risk analytics. *International Journal of Production Research*, 2018.

KITCHENHAM, B.; BRERETON, P.; BUDGEN, D.; TURNER, M.; BAILEY, J. Systematic literature reviews in software engineering. *Information and Software Technology*, 2009.

LASKURAIN-ITURBE, I.; ARANA-LANDÍN, G.; LANDETA-MANZANO, B.; URIARTE-GALLASTEGI, N. Exploring the influence of industry 4.0 technologies on the circular economy. *Journal of Cleaner Production*, v. 286, p. 125397, 2021.

LEWANDOWSKI, M. Designing the business models for circular economy—towards the conceptual framework. *Sustainability (Switzerland)*, 2016.

NASCIMENTO, D. L. M.; ALENCASTRO, V.; QUELHAS, O. L. G.; CAIADO, R. G. G.; GARZA-REYES, J. A.; LONA, L. R.; TORTORELLA, G. Exploring Industry 4.0 technologies to enable circular economy practices in a manufacturing context: A business model proposal. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 2019.

NASCIMENTO, D. L. M.; NEPOMUCENO, R. M.; CAIADO, R. G. G.; MAQUEIRA, J. M.; MOYANO-FUENTES, J.; GARZA-REYES, J. A. A sustainable circular 3D printing model for recycling metal scrap in the automotive industry. *Journal of Manufacturing Technology Management*, v. 33, n. 7, p. 1207–1224, 2022.

PETERSEN, K.; VELASCO, M.; FELDT, R.; MIAN, A.; KUHRMANN, M. Systematic mapping studies in software engineering. *EASE*, 2015.

ROSIN, F.; FORGET, P.; LAMOURI, S.; PELLERIN, R. Impacts of Industry 4.0 technologies on Lean principles. *Procedia CIRP*, 2017.

SUN, L.; WANG, Y.; HUA, G.; CHENG, T. C. E.; DONG, J. Virgin or recycled? Optimal pricing of 3D printing platform and material suppliers in a closed-loop competitive circular supply chain. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 159, p. 104814, 2020.

TAVA, L. O.; TOMLIN, B. Industry 4.0: Opportunities and Challenges for Operations Management. *Manufacturing and Service Operations Management*, 2018.

TRANFIELD, D.; DENYER, D.; SMART, P. Towards a methodology for developing evidence-informed management knowledge by means of systematic review. *British Journal of Management*, 2003.

ZHANG, Y.; WANG, Y. A bibliometric analysis on additive manufacturing in circular economy. *Journal of Cleaner Production*, 2022.