



ConBRepro

XI CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO



01 a 03
de dezembro 2021

Sustentabilidade na Manufatura Aditiva: uma visão geral sobre os potenciais do seu desenvolvimento

Claudia Rafaela do Nascimento

Engenharia de Produção – Universidade Federal do Paraná

Gabriel Augusto Trindade

Engenharia de Produção – Universidade Federal do Paraná

Ricardo Júnior de Oliveira Silva

Engenharia de Produção – Universidade Federal do Paraná

Resumo: O presente estudo, contextualizado dentro da vertente da Manufatura Aditiva e sustentabilidade, visou identificar os potenciais do desenvolvimento sustentável como estratégia para as organizações que utilizam Manufatura Aditiva. Para que isso fosse possível, uma revisão da literatura de natureza exploratória foi conduzida, utilizando de abordagem qualitativa para tratar e apresentar os dados obtidos no decorrer da pesquisa. O que se pode observar com o estudo é que do ponto de vista da sustentabilidade, a natureza aditiva da Manufatura Aditiva torna o processo de fabricação mais eficiente em recursos à medida que menos resíduos são gerados em comparação com técnicas subtrativas. Além disso, o aumento da velocidade do processo, bem como a ampliação dos materiais aplicáveis são listados como principais facilitadores na perspectiva de obter novos avanços sustentáveis a partir da Manufatura Aditiva.

Palavras-chave: Sustentabilidade; Manufatura Aditiva; Impressão 3D sustentável.

Sustainability in Additive Manufacturing: an overview of the potentials for its development

Abstract: This study, contextualized within the scope of Additive Manufacturing and sustainability, aimed to identify the potential of sustainable development as a strategy for organizations that use Additive Manufacturing. For this to be possible, an exploratory literature review was conducted, using a qualitative approach to treat and present the data obtained during the research. What can be seen from the study is that from a sustainability point of view, the additive nature of Additive Manufacturing makes a manufacturing process more resource efficient as less waste is generated compared to subtractive techniques. Furthermore, the increase in the speed of the process, as well as the expansion of applicable materials are listed as the main facilitators in the perspective of obtaining new sustainable advances from Additive Manufacturing.

Keywords: Sustainability; Additive Manufacturing; Sustainable 3D printing.

1. Introdução

Nos últimos anos as práticas de responsabilidade ambiental vêm sendo incorporadas as estratégias organizacionais, debates são realizados e iniciativas são cobradas pelos

governos e sociedade a fim de definir uma proposta para tratar os problemas ambientais causados pelo surto do crescimento econômico que iniciou após a segunda guerra mundial (1939-1945).

Posteriormente os avanços na área tecnológica não pararam, e, com isso, advieram-se as revoluções Industriais, iniciadas pela primeira Revolução Industrial em meados de 1960, passando pela Segunda em 1970 e tempos depois a Terceira, das quais a humanidade ainda se beneficia dos resultados trazidos por elas.

Atualmente vivencia-se a chamada Quarta Revolução Industrial, diferente das demais SCHWAB (2016, p.15) a define dizendo que “está evolui em um ritmo exponencial e não linear” e diz que “esse é o resultado do mundo multifacetado e profundamente interconectado em que vivemos; além disso, as novas tecnologias geram outras mais novas e cada vez mais qualificadas.”

A quarta revolução industrial define uma série de desafios para as empresas de manufatura sobre os pontos de vista tecnológico, organizacional e gerencial (Horváth & Szabó, 2019), podendo ser vista como a criação de uma indústria com máquinas conectadas, produtos e sistemas inteligentes, e soluções inter-relacionadas (Tortorella, 2018). O termo Indústria 4.0 surgiu em 2014 criado por 3 associações de engenharia da Alemanha, tendo como objetivo otimizar as cadeias de valor implementando uma produção autônoma e dinâmica (Zühlke & Kolberg, 2015).

Alguns avanços tecnológicos proporcionados pela nova revolução são a inteligência artificial, computação de alto desempenho, robótica, simulações virtuais e a Manufatura Aditiva, que já se fazem presente no dia a dia (Horváth & Szabó, 2019).

Tendo em vista o contexto da Indústria 4.0 e do avanço de suas tecnologias, esse estudo apresenta como objetivo principal identificar os potenciais do desenvolvimento sustentável como estratégia para as organizações que utilizam Manufatura Aditiva. Como objetivos específicos, propõem-se:

1. Avaliar os impactos da Manufatura Aditiva sobre meio ambiente.
2. Explorar o viés sustentável na Manufatura Aditiva sobre as óticas de consumo de recursos, gestão de desperdícios, controle de poluição, e descartabilidade.

Desta forma, buscando atingir os objetivos estipulados, uma Revisão da Literatura é feita a fim de realizar um levantamento bibliográfico para visualizar o que a literatura traz sobre o tema abordado.

Este artigo está estruturado em 4 partes principais onde na primeira trata-se qual a metodologia utilizada para a condução do estudo. A segunda trata sobre a Revisão da Literatura realizada acerca da Manufatura Aditiva, e Sustentabilidade na Manufatura Aditiva, trazendo os conceitos teóricos de cada um. Já na terceira parte apresentam-se os resultados e discussões obtidos no decorrer do projeto. Por fim, na quarta e última parte, encontram-se as considerações finais alcançadas com a pesquisa.

2. Metodologia

O enquadramento metodológico da pesquisa deste trabalho foi apresentado sob o enfoque de cada perspectiva: natureza do objetivo, coleta de dados, abordagem e procedimento do trabalho.

Quanto à natureza do objetivo, a metodologia se caracteriza como exploratória, pois constitui de um levantamento teórico sobre o tema, sem a finalidade de confirmar alguma hipótese.

Em relação à coleta de dados, este trabalho é realizado com base em pesquisa de dados secundários, que se constituem em artigos científicos disponibilizados nas bases de dados indexadas ao Portal da Capes e nas plataformas SCIEDIRECT e SCOPUS.

Quanto à abordagem do problema, a pesquisa é definida como qualitativa, devido à estrutura de coleta de dados secundários e ao entendimento da explicação do assunto estudado. Ou seja, há subjetividades e nuances que não são quantificáveis.

E no que diz respeito ao procedimento do trabalho, este se intitula como Pesquisa Bibliográfica, uma vez que as informações analisadas no estudo provêm apenas ou prioritariamente das referências levantadas nas bases de dados secundários. No dizer de Gil (1991), a pesquisa bibliográfica é um trabalho de natureza exploratória, que propicia bases teóricas ao pesquisador para auxiliar no exercício reflexivo e crítico sobre o tema em estudo.

Para a condução da Pesquisa Bibliográfica, foram definidas as palavras chaves "Manufatura Aditiva; Sustentabilidade; Manufatura Aditiva e Sustentabilidade; Impressão 3D sustentável; Tecnologia aditiva na sustentabilidade". Na sequência foram realizadas as buscas nas bases de dados supracitadas, verificado o alinhamento dos artigos científicos com o tema da pesquisa, para que então estes pudessem ser contemplados na revisão da literatura e posteriormente, avaliados e discutidos na apresentação dos resultados.

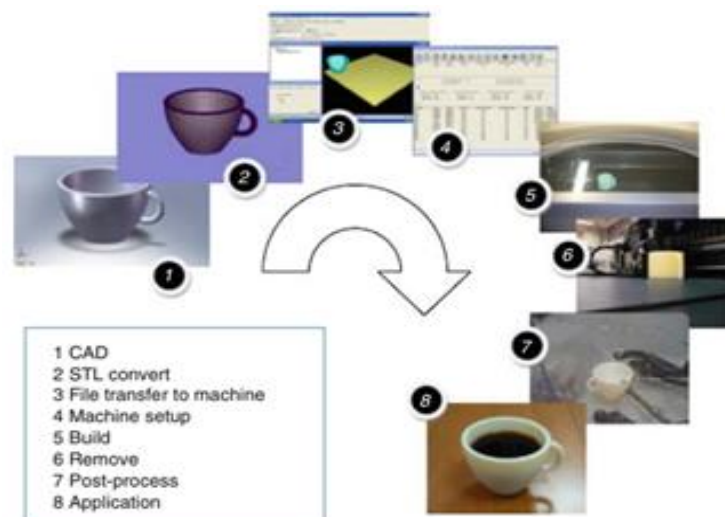
3. Revisão de Literatura

3.1 Manufatura Aditiva (MA)

O termo Manufatura Aditiva pode ser descrito, de forma simplificada, como sendo o processo de deposição de material, feito em camada por camada até a formação do objeto desejado (VOLPATO e CARVALHO, 2017). Para que a máquina imprima as peças é necessário ter, antecipadamente, um projeto feito por um Software 3D CAD e em seguida ser convertido para o formato STL, comumente chamado de Slicer, o qual será responsável por literalmente fatiar o projeto a fim de obter uma geometria para a impressora realizar a fabricação.

Dentro da área de MA há diversos tipos de tecnologias de fabricação os quais utilizam de formas diferentes para se produzir o objeto desejado, mas que convergem em 8 pontos comuns de fabricação apresentados por GIBSON, ROSEN e STUCKER (2010), sendo: 1º CAD; 2ª conversão para o STL; 3ª transferência de arquivo para máquina; 4ª configuração da máquina; 5ª construção; 6ª remoção; 7º pós-processamento; 8ª aplicação. Vide figura 1:

Figura 1: etapas de fabricação em MA



Fonte: GIBSON, ROSEN e STUCKER, (2010, p. 4)

Para o primeiro passo é, como supracitado, necessário ter um projeto desenvolvido em um Software 3D CAD o qual servirá como projeto norteador de produção para a impressora. No segundo passo, esse projeto-base é convertido para o formato STL e se encaminha para a próxima etapa. No terceiro, o projeto já convertido é transferido para a máquina a qual utilizará das informações nele contidas para dar início a produção. Nessa etapa, também é onde são realizados alguns ajustes com o arquivo, tais como: tamanho, posição e orientação para impressão. (GIBSON, ROSEN e STUCKER ,2010)

No quarto passo é feito a verificação de configuração da máquina, como a adição dos parâmetros de fabricação, timing, espessura de camada, entre outros. Então, caminha-se para o quinto passo, onde neste, a máquina já está apta para produzir e consegue seguir o processo sem a necessidade de observação contínua, somente em intervalos a fim de observar se há material de entrada e se está ocorrendo tudo como esperado. (GIBSON, ROSEN e STUCKER ,2010)

O sexto passo consiste em fazer a remoção da peça já pronta da impressora e observar o seu estado para a manipulação. No sétimo passo é feito o pós-processamento do objeto, como a limpeza e a remoção dos suportes de sustentação para impressão. E, por fim, no oitavo e último passo, o objeto é encaminhado para a aplicação prática. GIBSON, ROSEN e STUCKER (2010) ainda ressalvam que nessa etapa pode haver a necessidade de um tratamento adicional na peça, como aplicação de priming e pintura, para dar a ela uma melhor aparência (GIBSON, ROSEN e STUCKER ,2010).

Amplificando o conceito de Manufatura Aditiva além dos passos usados para sua produção, alguns dos pontos a serem considerados hoje em dia, ao desenvolver processos produtivos, são responsabilidade ambiental e sustentabilidade. Esses fatores são considerados de obrigatoriedade a serem levados em consideração ao se desenvolver uma tecnologia atualmente, devido às várias problemáticas que o mundo vem enfrentando decorrentes da poluição causadas pelo homem. Isso não se trata apenas de um modismo, mas sim de leis e acordos mundiais para a preservação e bem-estar do planeta, como o Relatório Brundtland de 1987, o qual favorece a concepção de um desenvolvimento mais ecologicamente correto (JACOBI, 2003). Nesse sentido, sustentabilidade na Manufatura Aditiva apresenta-se como um tópico necessário a ser discutido.

3.2 Sustentabilidade na Manufatura Aditiva

Segundo a EPA (United States Environmental Protection Agency), é crescente o número de empresas que tratam a sustentabilidade como uma meta importante alinhada às estratégias organizacionais com o objetivo de alavancar o crescimento e competitividade no mercado global. E essa motivação se deve a algumas razões como:

- Aumento da eficiência operacional devido redução de custos e desperdícios;
- Resposta rápida ao cliente com isso vantagem competitiva;
- Proteger a marca, construir uma reputação e adquirir a confiança do público;

A Manufatura Aditiva vem sendo amplamente utilizada por diferentes áreas industriais, e dentre elas é possível destacar a automotiva, aeroespacial, biomédica, energia de bens de consumo entre outras (Huang, 2015).

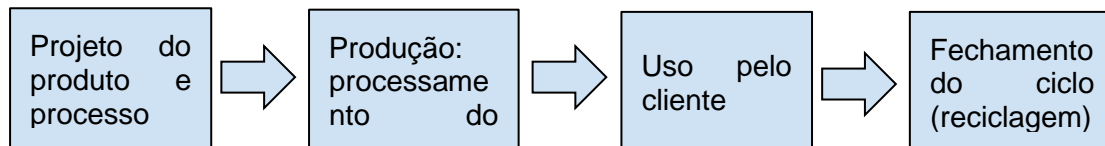
Ao contrário da Manufatura Subtrativa onde o material é removido de um bloco maior de material até a finalização do produto, a maioria dos processos da Manufatura Aditiva não produz resíduos excessivos, reduzindo assim os desperdícios. Além de versátil, a manufatura aditiva tem baixo custo, uma vez que não exige a construção de protótipos caros e ferramentais especializados, tornando-a atrativa para produção em menor escala (Pour et. al 2016).

Kellens et al (2017) estudaram na literatura quais os benefícios e fraquezas da Manufatura Aditiva em relação aos métodos tradicionais de fabricação, categorizando-os em 3 categorias: aspectos sociais, econômicos e ambientais. Nesta última, são destacados como benefícios da Manufatura Aditiva a redução de desperdício na produção, a maior eficiência no uso de material, as melhorias na remanufatura e a redução do peso das peças.

A Manufatura Aditiva tem o potencial de reduzir a quantidade de matéria-prima necessária na cadeia de suprimentos, reduzir a necessidade de processos de fabricação intensivos em energia, desperdício e poluentes, permitindo assim um projeto mais eficiente e flexível (Peng et al, 2018).

Despeisse e Ford (2016) realizaram uma análise com base em estudos de caso e agruparam as implicações da sustentabilidade na Manufatura Aditiva em quatro estágios do ciclo de vida do processo: projeto do produto e do processo, processamento de entrada de material, produto e componente feito sob encomenda, fabricação e fechamento do ciclo (Figura 2).

Figura 2: Os quatro estágios do ciclo de vida do processo aditivo sob a ótica das implicações na sustentabilidade



Fonte: adaptado de Despeisse e Ford (2016)

Os autores demonstram o potencial de redesenho da Manufatura Aditiva para melhorar o desempenho geral da sustentabilidade de produtos e processos. O material e a energia podem ser otimizados através da desmaterialização e redução do consumo de energia durante o processamento. Além disso, a adoção da Manufatura Aditiva pode resultar em redesenho da cadeia de valor da organização. O redesenho de produtos e componentes pode levar a produtos mais simples que requerem menos componentes, materiais, atores, estágios e interações (Despeisse e Ford, 2016).

Segundo Despeisse e Ford (2015), as análises de ciclo de vida mostram que a adoção da manufatura aditiva poderia promover uma economia nas fases de produção e uso de produtos. Segundo a pesquisa, as estimativas para 2025 variam entre \$113-370 bilhões e \$56-219 bilhões, respectivamente. De acordo com os autores, a economia na fase de produção decorre da redução da entrada e manuseio de materiais, juntamente com cadeias de suprimentos mais curtas.

Apesar da Manufatura Aditiva apresentar um potencial significativo para promover uma fabricação mais limpa a custos satisfatórios, há estudos que demonstram que esse processo ainda não pode ser considerado um método de fabricação ecológico devido ao alto custo com consumo de energia que é utilizado pelo processo de calor ou laser para derretimento da matéria-prima plástico ou metal. Para demonstrar de fato seu potencial como um processo que está alinhado aos objetivos de reduzir o impacto ambiental, o processo de Manufatura Aditiva precisa atender aos seguintes princípios de sustentabilidade: uso eficiente de materiais, energia, gestão de resíduos industriais, baixo custo de fabricação, prevenção de emissões de materiais tóxicos a saúde, eficiência econômica, reutilização, reciclabilidade e descartabilidade dos produtos fabricados pela manufatura aditiva (Domnita e Rotaru, 2017).

De acordo com Hu et. al (2020, p1-2), o principal recurso consumido pela Manufatura Aditiva é a energia, sendo que este consumo está relacionado a diversos fatores categorizados em termos de design de produto, processamento, ambiente de trabalho e material. No entanto, o impacto desses atributos na manufatura aditiva ainda é

inconsistente, o que em partes se deve aos diferentes princípios aplicados a cada processo para execução da fabricação.

Quando o tema se trata de matéria prima, para Hang et. al (p.1194) ao contrário da manufatura subtrativa onde uma grande quantidade de material precisa ser removida, a manufatura aditiva utiliza a matéria prima de forma eficiente, por construir peças camada por camada as sobras de material podem frequentemente ser reutilizadas com processamento mínimo.

Como a produção é customizada, Depeisse e Ford (2016) indicam que se pode ajudar a eliminar ou pelo menos minimizar o desperdício de estoque, reduzir o risco de estoque sem bens acabados não vendidos, e ainda há o potencial de melhorar o fluxo de receita à medida que as mercadorias são pagas antes de serem fabricadas.

Devido às características de seu modelo de produção, segundo Hang et. al (p. 1196), “quando comparada a manufatura subtrativa, a manufatura aditiva tem o potencial de reduzir o ciclo de vida da massa material e a energia consumida eliminando a criação de sucata e o uso de processos auxiliares prejudiciais na entrada”. Os autores ainda destacam que a poluição terrestre, aquática e atmosférica produzida pela manufatura aditiva é muito menor que a produzida pela manufatura convencional.

Outro aspecto destacado é com relação à logística envolvida em sua cadeia produtiva. A logística é simplificada à medida que menos insumos básicos de materiais são necessários. Além disso, os estoques de componentes e produtos podem ser reduzidos ou eliminados, reduzindo assim as perdas econômicas e os impactos ambientais associados a componentes não vendidos e obsoletos (Chen et al., 2015)

Huang et. al (p. 1194) trazem outro benefício sobre a Manufatura Aditiva. O modelo também pode desempenhar um papel significativo nos cuidados à saúde, visto que tem sido amplamente utilizado para produzir implantes cirúrgicos e dispositivos auxiliares para melhorar o bem-estar da população.

Com relação a aplicabilidade e escalabilidade da tecnologia, Rejeski, Zhao e Huang (2018, p.24) destacam que “processos sofisticados de Manufatura Aditiva estão sendo usados em startups e pequenas oficinas de prototipagem, porões e garagens e até mesmo salas de aula onde podem faltar sistemas sofisticados de ventilação e controle de emissões”. Devido à maior acessibilidade a Manufatura Aditiva fez com que a comunidade minimizasse os riscos à saúde e segurança.

Diferentes tipos de materiais podem ser utilizados na criação de protótipos incluindo metais, cerâmicas, polímeros compostos ou fundidos (plásticos) sendo que esse último não é ideal para o meio ambiente. Alguns plásticos são mais poluentes que outros e a utilização de materiais biodegradáveis pode ser a solução, por exemplo, o PLA (Polylactic Acid, Polylactide) que possui mais benefícios que o ABS.

O PLA é um material biodegradável derivado de recursos renováveis (amido de milho, raízes de tapioca, ou cana-de-açúcar) sendo um polímero de base biológica (menos tóxico) e necessitando de temperatura mais baixas de impressão resultando na redução do consumo de energia (Domnita e Rotaru, 2017).

Com relação ao fechamento do ciclo de vida do produto e a descartabilidade dos materiais, as técnicas avançadas empregadas no processo de Manufatura Aditiva têm o potencial de transformar lixo em riqueza. Devido à falta de esforços e motivação para reciclagem, alguns materiais plásticos ainda são encontrados em abundância no lixo, abrangendo PET (garrafas plásticas de bebidas, HDPE/LDPE (garrafas de detergentes) e ABS (lixo eletrônico, peças de carro etc.). Esses materiais passam por um processo inicial de

separação e limpeza e posteriormente granulação para então se transformarem em filamentos que serão utilizados pela impressora 3D (Mohammed et. al).

Melhorar o desempenho dos produtos por meio da simplificação pode reduzir a escala do fluxo de material e levar a uma redução do impacto ambiental sobre toda a cadeia de fornecimento. A mudança de um sistema centralizado de fabricação para um mais descentralizado implica que o impacto ambiental do transporte será reduzido e, ao mesmo tempo, apoiar e capacitar as comunidades locais (Chen et al., 2015).

4. Apresentação dos Resultados

A partir da Revisão de Literatura feita com base em estudos já realizados, verificou-se que indústrias, organizações de proteção ao meio ambiente e governos têm se mobilizado na busca de medidas que venham a conter o impacto da produção sobre o meio ambiente. A Manufatura Aditiva está na vanguarda do movimento sustentável, sendo uma opção para uma produção mais limpa e com menos danos à natureza. No entanto, cabe destacar que estudos já demonstraram que mesmo com vantagens sustentáveis, seu maior consumo está na energia elétrica. Alguns poucos estudos apontam que o alto consumo pode estar diretamente relacionado aos parâmetros selecionados para impressão ou complexidade e geometria da peça, porém esse é um item que merece um maior enfoque pois ainda há poucos estudos sobre esse tema.

Apesar de haver iniciativas para a reutilização do plástico, o que é muito bem-visto sob a ótica da sustentabilidade, há de ser considerado se o processo realizado para chegar até o produto reciclado também é sustentável. É importante destacar que entre os procedimentos usualmente aplicados estão a lavagem da peça impressa para remover a sujeira e fuligem, a secagem das peças e posteriormente a extrusão a temperaturas de 200°C a 205°C, sendo que esse último resultará novamente em consumo de energia.

Embora a Manufatura Aditiva tenha tido avanços significativos nos últimos anos, ainda há desafios que precisam ser superados para que essa tecnologia possa ser utilizada de maneira sustentável. Entre elas estão a redução do consumo de energia no processo produtivo; a melhoria da resistência do material PLA o qual é o material mais ecologicamente correto, porém ainda não apresenta tanta maturidade e resistência quanto o ABS; e a maior escalabilidade do processo, visto que o mesmo ainda é muito utilizado para produção em baixa escala, o que faz com que no cenário atual ela ainda esteja distante de substituir a manufatura subtrativa, a mais tradicional.

Este fato é apresentado por alguns pesquisadores, ao afirmarem que os demais meios de produção em massa permanecerão representativos no mercado, e o que se modificará serão somente as produções mais exclusivas e personalizadas (JIANG, KLEER e PILLER, 2017). Em outras palavras, por mais que a produção em impressão 3D esteja e possa permanecer em destaque, ela não fará com que os demais meios de produção tradicionais desapareçam.

5. Considerações Finais

Do ponto de vista da sustentabilidade, a natureza aditiva da Manufatura Aditiva o torna um processo de fabricação mais eficiente em recursos à medida que menos resíduos são gerados em comparação com técnicas subtrativas. Embora possa-se argumentar que o Manufatura Aditiva é mais intensivo em energia por unidade produzida, a Manufatura Aditiva permite que as unidades sejam produzidas para corresponder exatamente à demanda (modelo make-to-order) e, portanto, oferece o potencial para um melhor desempenho absoluto do processo, a desmaterialização e redução de resíduos (Chen et al., 2015).

Grandes economias adicionais podem ser obtidas se a Manufatura Aditiva evoluir adequadamente e se tornar aplicável aos mercados de produção em larga escala (Kellens et al, 2017). O aumento da velocidade do processo aplicado na Manufatura Aditiva, bem como a ampliação dos materiais aplicáveis são listados como principais facilitadores nessa perspectiva.

Ademais, considera-se o objetivo geral da pesquisa de identificar os potenciais do desenvolvimento sustentável como estratégia para as organizações que utilizam Manufatura Aditiva. E os objetivos específicos de 1. Avaliar os impactos da Manufatura Aditiva sobre meio ambiente; e 2. Explorar o viés sustentável na Manufatura Aditiva sobre as óticas de consumo de recursos, gestão de desperdícios, controle de poluição, e descartabilidade, foram alcançados com sucesso.

Como sugestão de trabalhos futuros, propõe-se estudar resultados quantitativos de indicadores que abrangem os principais pilares da sustentabilidade comparando com as manufaturas subtrativas, explorar as melhores práticas relacionadas à sustentabilidade para aplicação na Manufatura Aditiva e estudar os efeitos relacionados à sustentabilidade a partir da implantação da Manufatura Aditiva e demais tecnologias da Indústria 4.0 nos modelos de negócio que anteriormente utilizavam apenas os métodos tradicionais de fabricação.

Referências

CHEN, D.; HEYER, S.; IBBOSTON, S.; SALONITIS, K.; STEINGRÍMSSON, J.G.; THIEDE, S.; 2015. Direct digital manufacturing: definition, evolution, and sustainability implications. J. Clean. Prod. Vol.107, 615-625, Nov.2015. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652615005429>>

DESPEISSE M.; FORD S.; Additive manufacturing and sustainability: an exploratory study of the advantages and challenges, Journal of Cleaner Production, Volume 137, 2016, p. 1573-1587, ISSN 0959-6526. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.04.150>>

DESPEISSE M; FORD S; The Role of Additive Manufacturing in Improving Resource Efficiency and Sustainability, IFIP WG 5.7 International Conference, Tokyo, Japan, Setembro, p. 129-136. Disponível em: <https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-22759-7_15>

GIBSON, I.; ROSEN, D.; STUCKER, B.; Additive manufacturing technologies. New York: Springer, 2010.

GIL, Antônio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. São Paulo. Atlas. 1991.

HORVÁTH D; SZABÓ R; Driving forces and barriers of Industry 4.0: Do multinational and small and medium-sized companies have equal opportunities? (2019) Technological Forecasting and Social Change, 146, p. 119-132. Disponível em:<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0040162518315737> >

JACOBI, P; Educação ambiental, cidadania e sustentabilidade. Cad. pesquisa, p. 189-206, 2003. Disponível em: <https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-15742003000100008&script=sci_abstract&tlng=es>

JIANG, R; KLEER, R; PILLER, Frank T. Predicting the future of additive manufacturing: A Delphi study on economic and societal implications of 3D printing for 2030. Technological Forecasting and Social Change, v. 117, p. 84-97, 2017. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0040162517300276>>

HU, F; LIU Y; QIN, J; SUN, X; WITHERELL, P; Feature-level Data Fusion for Energy Consumption Analytics in Additive Manufacturing, p.20-24, 2020 IEEE 16th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE), Kong, China, Oct. 2020. Disponível em:< <https://ieeexplore.ieee.org/document/9216947>>

HUANG, H.S.; PENG, L.; MOKASDAR A; HOU, L; Additive manufacturing and its societal impact a literature review, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 67, Oct.2012, p.1191-1203. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-012-4558-5>>

KELLENS, K., Baumers, M., Gutowski, T.G., Flanagan, W., Lifset, R. and Duflou, J.R. (2017), Environmental Dimensions of Additive Manufacturing: Mapping Application Domains and Their Environmental Implications. Journal of Industrial Ecology, 21: S49-S68. Disponível em <<https://doi.org/10.1111/jiec.12629>>

KOLBERG D., ZÜHLKE D. Lean Automation enabled by Industry 4.0 Technologies (2015) IFAC-Papers Online, 28 (3), pp. 1870-1875. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896315005984>>

MOHAMED, I.M; KERVIN; G.E; WILSON, D; ROSSON, L; EcoPrinting: Investigation of Solar Powered Plastic Recycling and Additive Manufacturing for Enhanced Waste Management and Sustainable Manufacturing, Conference: 2018 IEEE Conference on Technologies for Sustainability (SusTech), School of Engineering, Deakin University, Geelong Australia, November 2018. Disponível em:< [\(PDF\) EcoPrinting: Investigation of Solar Powered Plastic Recycling and Additive Manufacturing for Enhanced Waste Management and Sustainable Manufacturing \(researchgate.net\)](#)>

PENG Tao, KELLENS Karel, TANG Renzhong, CHEN Chao, CHEN Gang, Sustainability of additive manufacturing: An overview on its energy demand and environmental impact, Additive Manufacturing, Volume 21, 2018, Pages 694-704, ISSN 2214-8604, <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.04.022>

REJESKI, D.; ZHAO, F.; Huang, Y; Research needs and recommendations on environmental implications of additive manufacturing, Additive Manufacturing, Vol. 19, Jan.2018, p.21-28. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221486041730177X>>

SCHWAB, Klaus. **A quarta revolução industrial**. Edipro, São Paulo 2016.

SUSTAINABLE MANUFACTURING.United States Environmental Protection Agency. Disponível em:<<https://www.epa.gov/sustainability/sustainable-manufacturing>>

TORTORELLA GL, FETTERMANN D. Implementation of Industry 4.0 and lean production in Brazilian manufacturing companies. International Journal of Production Research 56.8 (2018): 2975-2987. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00207543.2017.1391420?journalCode=tpres20>>

Umeda S.; Nakano M.; Mizuyama H.; Hibino H.; Kiritsis D.; Von, C. G; Advances in Production Management Systems: Innovative Production Management Towards Sustainable Growth. APMS 2015. IFIP Advances in Information and Communication Technology, vol 460. Springer, Disponível em: < <https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=LaxnCgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR5&dq=Advances+in+Production+Management+Systems:+Innovative+Production+Management+Towards+Sustainable+Growth&ots=gRHRjXcY22&sig=zYm5vIrl1iyw0LnfMXqbA5ZNRJ88#v=onepage&q=Advances%20in%20Production%20Management%20Systems%3A%20Innovative%20Production%20Management%20Towards%20Sustainable%20Growth&f=false>>

VOLPATO, Neri; CARVALHO, Jonas de. Introdução à Manufatura Aditiva ou impressão 3D. In: VOLPATO, Neri (Org). Manufatura aditiva: tecnologias e aplicações da impressão 3D. Editora Blucher, 2017.