

SUSTENTABILIDADE VIA MANUFATURA ADITIVA

Autor

Filipe Wiltgen¹

Resumo

É fato que os recursos disponíveis no planeta se renovam. Entretanto, é fato também, que o período de tempo para que isso se realize é muito maior do que a existência humana no planeta que é de ~200 mil anos. Ao compreender que os seres humanos podem ter limitações na disponibilidade dos recursos naturais, é possível compreender também que deve existir uma preocupação na sustentabilidade dos recursos. Neste artigo será discutida a utilização da Manufatura Aditiva, processo no qual existe cuidado na utilização consciente dos recursos na forma de matéria-prima disponível para a fabricação de produtos nos processos industriais de manufatura. A Manufatura Aditiva é basicamente uma das três formas tradicionais de fabricação industrial. Seu princípio de funcionamento estabelece que deve ser utilizada a quantidade, quase exata, de matéria-prima para compor um determinado objeto. O que permite supor que não haverá desperdício significativo de material no processo. O processo mais comum na Manufatura Aditiva é a impressão em 3D. As atuais técnicas permitem construir em quase todos os tipos de materiais existentes (vidro, metais, cerâmicas, polímeros e material orgânico). Nesta pesquisa será apresentada a importância do uso da Manufatura Aditiva para obter a sustentabilidade necessária na fabricação de produtos humanos agora e no futuro.

Palavras-chave: Manufatura. Fabricação. Sustentabilidade. Manufatura Aditiva. Impressão 3D.

SUSTAINABILITY VIA ADDITIVE MANUFACTURING

Abstract

It is a fact that resources available on the planet are renewed. However, it is also a fact that period of time for this to happen is much longer than the human existence on the planet, which is ~200 thousand years. By understanding that human beings may have limitations in availability of natural resources, it is also possible to understand that there must be a concern for the sustainability of resources. This paper will discuss use of Additive Manufacturing, a process in which there is care in conscious use of resources in form of raw materials available for manufacture of products in industrial manufacturing processes. Additive Manufacturing is basically one of three traditional forms of industrial manufacturing. Its operating principle establishes that almost exact amount of raw material must be used to compose a given object. This allows us to assume that there will be no significant waste of material in process. The most common process in Additive Manufacturing is 3D printing. Current techniques allow building in almost all types of existing materials (glass, metals, ceramics, polymers and organic material). This research will present importance of using Additive Manufacturing to obtain necessary sustainability in manufacture of human products now and in the future.

Keywords: Manufacturing. Fabrication. Sustainability. Additive Manufacturing. 3D printing.

¹ Doutorado em Engenharia Eletrônica e Computação pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA e docente na Faculdade de Tecnologia do Estado de São Paulo - FATEC Pindamonhangaba e Cruzeiro, no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Estado de São Paulo - IFSP Campinas e na Universidade Taubaté - Unitau. ORCID 0000-0002-2364-5157. E-mail: profwiltgen@gmail.com

INTRODUÇÃO

Os dinossauros viveram sobre a Terra por cerca de ~65 milhões de anos, foram extintos e em seu lugar surgiram espécies de menor porte e que desta forma poderiam exigir menos dos recursos naturais disponíveis no planeta. Isso foi verdade durante milhares de anos até que a espécie humana começou a se tornar dominante há aproximadamente 200 mil anos.

Entretanto, com o crescimento populacional e uma maior expectativa de vida da espécie humana, a utilização dos recursos disponíveis no planeta começou a preocupar a sociedade. De forma muito diferente ao que ocorreu com os dinossauros, no qual foram os recursos alimentícios que foram se tornando insuficientes, os seres humanos bem menores, porém tecnologicamente evoluídos, fizeram uso de outros recursos naturais os quais até então não haviam sido explorados pelas outras espécies no planeta.

Tais recursos permitiram uma rápida evolução cultural de espécies caçadoras-coletoras para agricultoras no qual a se estabelecerem em determinados locais os exploravam de todas as formas a fim de suprir as necessidades de sobrevivência. Atualmente as necessidades de sobrevivência mudaram, Recursos como combustíveis e fontes de energia se tornaram necessidades básicas da vida humana.

Dentre estas necessidades, a construção de utensílios e objetos, como as ferramentas, meios de transporte, incluindo o transporte de água (limpa e de esgoto), compostos químicos e alimentícios, além é claro das edificações fizeram o ser humano ser hábil é construir. Um dos processos mais comuns de construção humana é a manufatura industrial. Com o advento da manufatura em processos industriais do século XIV em grandes centros urbanos, houve uma grande mudança na utilização da matéria-prima, e desta forma dos recursos disponíveis.

Atualmente a sociedade consciente da necessidade de racionalização dos recursos percebe a importância em ser sustentável e isso sem dúvida é premente para a vida humana. Dentre as formas de maior impacto hoje, tem-se a manufatura industrial que precisa evoluir rápido das formas tradicionais para as formas mais modernas e mais sustentáveis nos processos de fabricação tal como a Manufatura Aditiva (WILTGEN, 2019; ALCALDE e WILTGEN, 2018).

2 METODOLOGIA APLICADA

A metodologia aplicada é do tipo exploratória qualitativa baseada em estudo bibliográfico. De tal forma que a pesquisa permite argumentar o estudo por meio de análises e percepções qualitativas investigando um determinado problema apresentando hipóteses baseadas na busca de pesquisa bibliográfica para facilitar a compreensão do tema abordado.

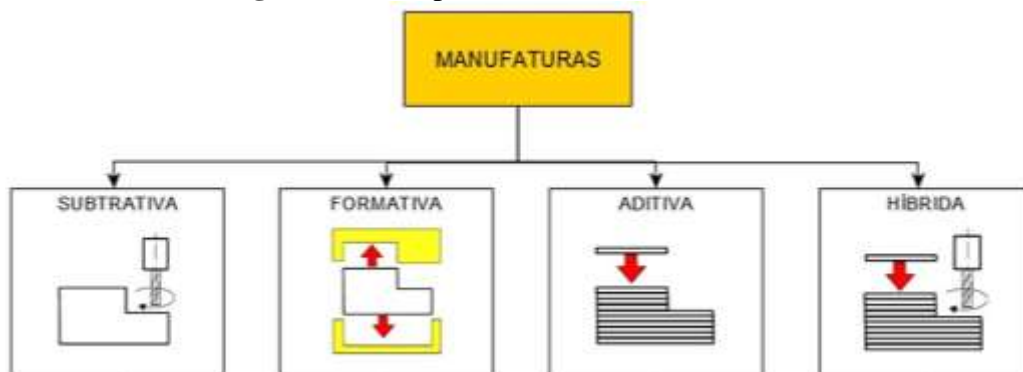
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Tipos de Manufatura e a Manufatura Aditiva

Dos diversos tipos de manufatura existentes, hoje existem basicamente três tipos, manufatura subtrativa, no qual retira-se o matéria-prima para poder fabricar um objeto, manufatura aditiva, no qual se introduz matéria-prima para poder fabricar um objeto e a manufatura formativa, que através de um molde, construído por manufatura subtrativa ou aditiva, permite replicar em grande volume objetos similares do mesmo tipo e geometria de forma rápida e com baixo custo. Existe ainda um quarto tipo de manufatura que é a união dos outros processos no qual é chamado de manufatura híbrida, unindo os outros tipos de manufatura em um processo conjunto (WILTGEN, 2020B; ALCALDE e WILTGEN, 2018; GOMES e WILTGEN, 2020).

Na Figura 1 é possível observar os tipos de manufaturas industriais existentes na atualidade. Note que cada um possui uma forma diferente de tratar a utilização da matéria prima.

Figura 1 – Os tipos de manufatura industriais.



Fonte: Adaptado de Wiltgen (2021A).

A escolha do processo de manufatura industrial não está atrelada apenas à sustentabilidade, e sim em diversos outros parâmetros que vão desde custos de investimento e de treinamento até a reformulação de estratégias de vendas e marketing. Fato é que em algum momento a sociedade irá se impor as decisões industriais com o poder de compra em produtos que sejam sustentáveis.

A forma de manufatura aditiva faz uso de quantidade de matéria prima suficiente para apenas construir o que é preciso, quase sempre a quantidade da matéria-prima exata e necessária, o qual não chega a ultrapassar ~2% do total. Entretanto, o que mais se destaca na sustentabilidade da manufatura aditiva é a possibilidade da reutilização da matéria-prima de um objeto na construção de outros, ou mesmo da transformação de outros produtos de outras formas de fabricação em matéria-prima para a manufatura aditiva (COLORADO *et al.*, 2020).

Na Figura 2 é possível observar os principais processos que envolvem à sustentabilidade via a manufatura aditiva. Se dividindo em processos da sociedade, processos econômicos e de segurança (JAVID *et al.*, 2021; NGUYEN *et al.*, 2018; NASCIMENTO *et al.*, 2021).

Figura 2 – Os desdobramentos referentes à sustentabilidade via a manufatura aditiva.



Fonte: Adaptado de Javid *et al.* (2021).

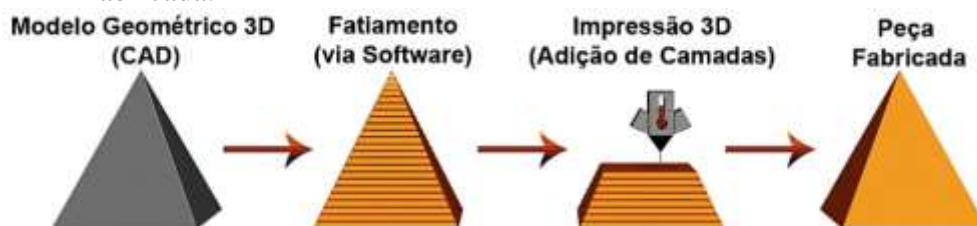
Atualmente quem mais tem realizado o reprocessamento de material chamado de reciclado é o processo de manufatura aditiva que utiliza como matéria-prima os plásticos. Famosos por serem vistos como inimigos do meio ambiente, os plásticos de forma geral são um problema que ainda não é contornável devido à enorme quantidade produzida e utilizada em todo o planeta (HWANG *et al.*, 2020).

Em manufatura aditiva chamada de *FDM* (*Fused Deposition Modeling*) ou modelamento por deposição de material fundido por extrusão, faz uso de plásticos na forma de filamentos bobinados que transformam o filamento plástico nos objetos e utensílios necessários na indústria e fabricação de peças.

O processo é baseado na formação de uma peça que é modelada em 3D e fatiada em pequenas camadas geométricas em duas dimensões (*X* e *Y*) cuja altura de cada camada, ou o fatiamento é determinado pela dimensão da espessura (*Z*). A composição de várias fatias na dimensão *Z*, ou seja, na altura determina a fabricação de uma peça em impressão 3D.

Como pode ser visto na Figura 3 é gerado um modelo 3D em CAD, que depois é fatiado e fabricado em 3D.

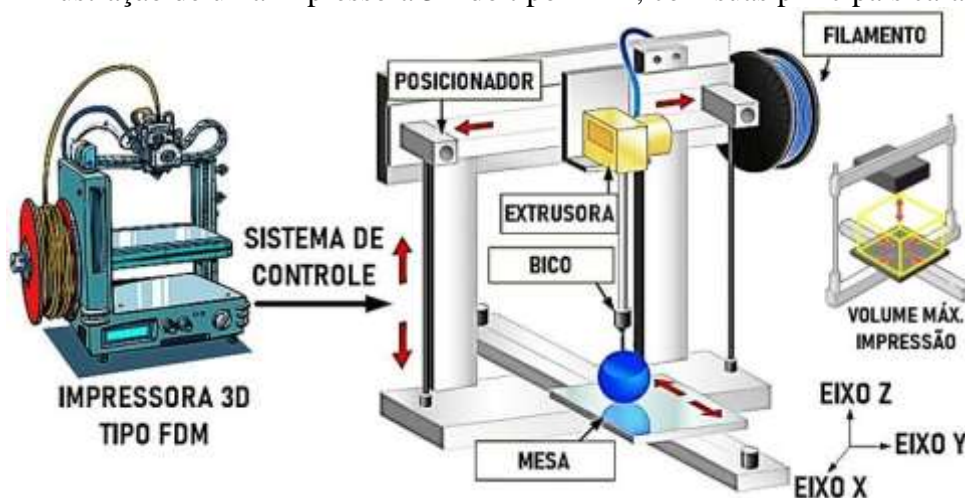
Figura 3 – Modelo geométrico em 3D construído em programas de CAD - fatiamento do modelo em duas dimensões seguido do processo de impressão 3D com a peça fabricada.



Fonte: Adaptado de Wiltgen (2023).

Na Figura 4 é possível observar as principais características referentes a uma impressora 3D do tipo *FDM*.

Figura 4 – Ilustração de uma impressora 3D do tipo *FDM*, com suas principais características.



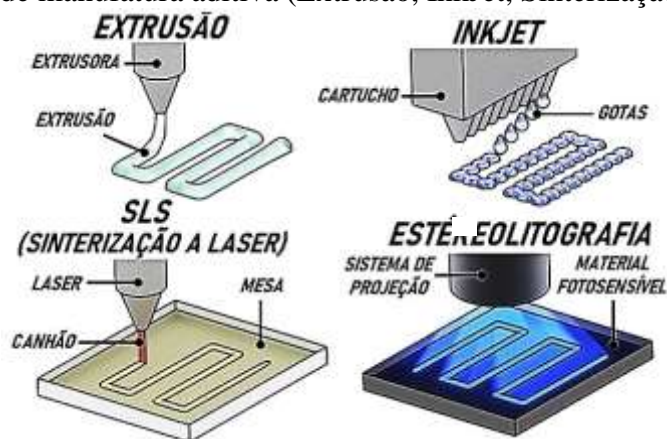
Fonte: Adaptado de Wiltgen (2023).

Neste processo, tanto as espessuras de cada camada (altura em Z), como o preenchimento interno e espessura das paredes podem não só economizar matéria-prima, como também fazer o uso racional do tempo de fabricação para cada tipo de aplicação no qual a peça a ser fabricada demanda.

Assim desta forma, dependendo da aplicação podem ser construídas de forma econômica ou rápida tudo o que não necessitar de muito esforço, e as demais peças que precisar de maior robustez, podendo fazer uso de diferentes formas geométricas internas que permitem economizar na matéria-prima e manter o esforço físico necessário para cada tipo de uso.

Dentre os tipos mais comuns de fabricação via manufatura aditiva em 3D com material plástico tem-se, a Extrusão (uso de *FDM*), Gotejamento (uso de *InkJET*), Sinterização a Laser (uso de *SLS*) e a primeira forma de construção em 3D que é a Estereolitografia (uso de luz ultravioleta na cura de uma resina com *STL*) e, como pode ser observado na Figura 5.

Figura 5 – Técnicas de manufatura aditiva (Extrusão, InkJet, Sinterização e Estereolitografia).



Fonte: Adaptado de Hussain e Butcher (2018).

Na Figura 6 é possível observar estudos de esforços físicos necessários para que possa ser removida a matéria-prima que não fará diferença na rigidez dos esforços físicos necessários para que uma determinada peça possa ser fabricada de forma a economizar em tempo de fabricação e matéria-prima necessária para a manufatura (WILTGEN, 2019; WILTGEN e ALCALDE, 2019).

Figura 6 – Apresenta o estudo de esforços físicos e a economia de matéria-prima na fabricação de peças cujo os esforços são preservados.



Fonte: Adaptado de MX3D (2023).

Na Figura 6 é possível ver a peça na cor laranja (a primeira imagem da esquerda para a direita) é a peça original do estudo, na sequência (no centro) a simulação de esforços físicos, e pôr fim a extração da parte física importante para a fabricação da peça com economia de matéria-prima (a primeira imagem da direita para a esquerda) (LOPES *et al.*,2022).

Na Figura 7 pode ser observada a comparação entre uma peça construída com redução de massa e matéria-prima fabricada via manufatura aditiva em metais (a esquerda) e um original

sem o estudo de redução de massa (a direita) fabricada em manufatura subtrativa (GOMES e WILTGEN, 2020; TAMANINI e WILTGEN, 2022; WILTGEN, 2022A; 2022B; 2022C).

Figura 07 – Comparação entre uma peça fabricada via manufatura aditiva em metal (a esquerda) e outra fabricada por manufatura em manufatura subtrativa (a direita).



Fonte: Adaptado de Siemens (2023).

Na Figura 8 pode ser visto uma ilustração de como a indústria automotiva, planeja avançar sobre a forma de aplicar a manufatura aditiva em substituição à antiga forma de linha de produção de *Henry Ford*. A estimativa é que até 2030 não exista mais linha de produção de automóveis e sim células de fabricação individuais no qual os veículos serão construídos por completo via diversas formas e técnicas de manufatura aditiva (WILTGEN 2021A; 2021B).

Figura 08 – Uma futura fábrica de automóveis baseado em células construtivas independentes e autossuficientes em manufatura aditiva de múltiplos tipos de materiais.



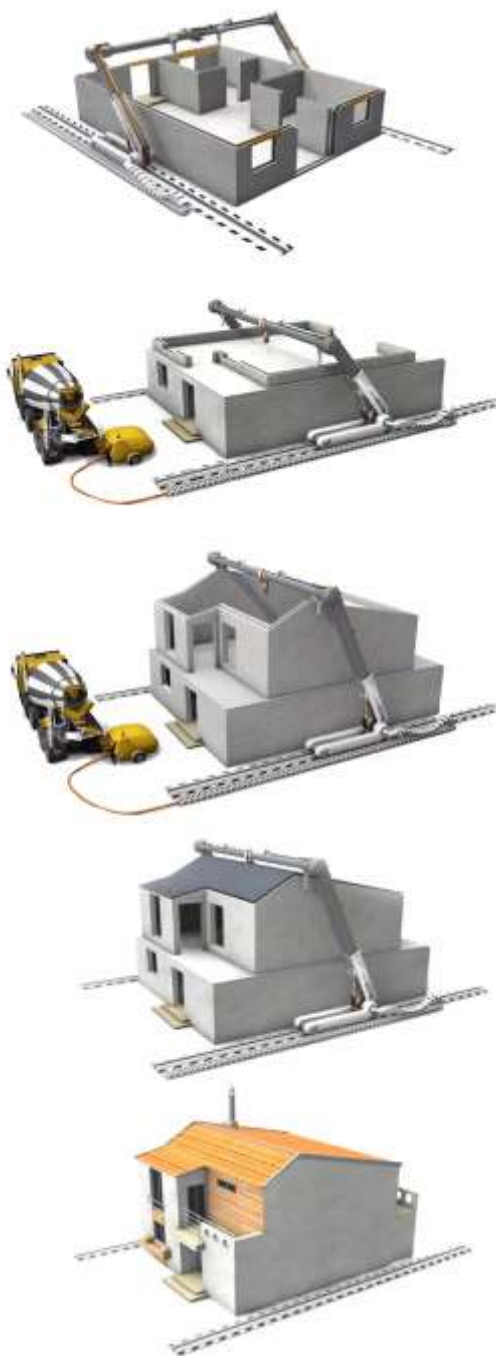
Fonte: Adaptado de N. Gurrado (2023).

Outra forma revolucionária de utilizar a manufatura aditiva de forma sustentável é a com a construção em concreto, principalmente ao que se refere à construção civil. A empresa e

a máquina que mais tem chamado a atenção é a do *Prof. Behrokh Khoshnevis* e sua empresa a *Contour Crafting*.

A Figura 09 é uma sequência que ilustra a construção em poucas horas de uma casa completa por uma impressora 3D de concreto planejada pela *Contour Crafting*, evitando mais de 40% de desperdício de matéria-prima.

Figura 09 – Ilustração da construção de uma casa impressa em 3D com concreto.



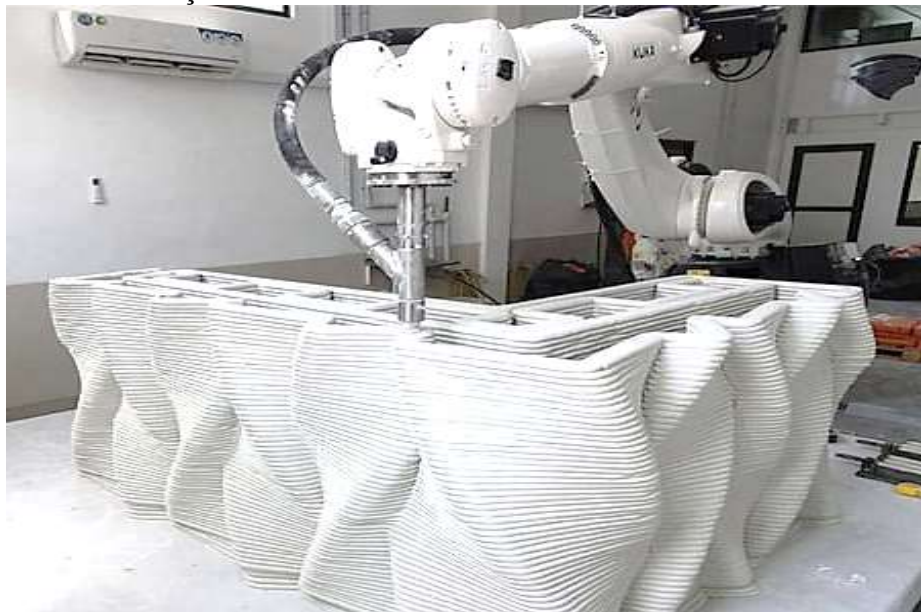
Fonte: Montagem adaptada de *Contour Crafting* (2018).

É possível observar na Figura 9 que toda a parte construtiva é realizada por um equipamento de manufatura aditiva, depois no final da construção a parte do acabamento é feita de forma tradicional.

Diversas são as iniciativas de construções de residências (casa e apartamentos), locais comerciais e pontes com a manufatura aditiva, e não apenas usando concreto, mas metais e a mistura deles em conjunto. Fato é que não será novidade em poucos anos se deparar com máquinas construindo edificações nas cidades.

Na Figura 10 é possível ver formas geométricas complexas e detalhadas em concreto, e assim entender que as opções construtivas com a manufatura aditiva em concreto podem alcançar projetos avançados que a construção civil e a arquitetura apesar de idealizar até então não poderiam ser construídos sem o auxílio da manufatura aditiva.

Figura 10 – Construção física real de um detalhe de acabamento de uma construção civil utilizando a manufatura aditiva em concreto.



Fonte: Adaptado de *Besix 3D* (2022).

Outro ponto muito importante para a sustentabilidade da manufatura na indústria é como automatizar a utilização de diversas máquinas de manufatura aditiva operando em conjunto e manipuladas de forma tradicional por braços robóticos que de forma coordenada cuidam de uma célula com dezenas de impressoras 3D operando de forma individual e sob um gerenciamento central de coordenação de produção.

A integração completa de automação com a manufatura aditiva abrirá caminhos que ainda são a maior dificuldade para a implementação contundente da Manufatura Avançada (indústria 4.0).

Na Figura 11 é possível perceber que se a indústria for baseada em células de manufatura aditivas automatizadas com materiais sustentáveis, a presença humana será útil apenas na inicialização ou manutenção quando necessária, as filas de produção de peças serão gerenciadas diretamente pelo processo de automatização de retirada de peças impressas, sejam elas quais forem. O braço robótico deve acessar de forma simples as impressoras retirando as peças e armazenando-as nos locais destinados (WILTGEN, 2020A; COMENALE e WILTGEN, 2021).

Figura 11 – Exemplo de uma célula de fabricação em manufatura aditiva automatizada.



Fonte: Adaptado de *Institut for Integrierte Produktion Hannover - IPH* (2019).

Observe que neste exemplo as máquinas de manufatura aditiva utilizadas neste exemplo de células de fabricação possuem impressoras 3D com técnica de funcionamento do tipo *FDM*, ou seja, a para produção em plásticos.

Este tipo de fabricação abre caminho para que empresas planejem a inserção da manufatura aditiva na substituição de linhas de montagem. As células de fabricação são o primeiro passo para seguir em células de montagem, e implementar a Manufatura Avançada (indústria 4.0).

3.2 Reciclagem e Economia de Matéria-Prima via Manufatura Aditiva

Observa-se que independentemente do tipo de técnica empregada em impressão 3D é possível economizar matéria-prima, quer seja em plástico quer seja em metal. Cabe lembrar

que diversas ligas metálicas poderiam se beneficiar com este tipo de procedimento devido ao elevado custo da matéria-prima, e isso também impacta tanto em economia de recursos quanto em economia monetária. Muitos materiais podem ser reciclados, principalmente os metálicos e plásticos.

Um dos principais materiais a serem reciclados no mundo é o plástico do tipo *PET* (Politereftalato de Etileno ou Polietileno Tereftalato), os quais são amplamente utilizados no envasamento de bebidas entre outros em formato de garrafas. Este parece ser um dos principais materiais a serem tratados e reaproveitados de forma a ser utilizado novamente, mesmo que fossem para serem protótipos de peças a serem manufaturadas via impressão 3D (AWAJA e PAVEL, 2005; CHONG *et al.*, 2017; FORMIGONI *et al.*, 2014).

A reciclagem deste plástico tem importância ímpar para o meio ambiente, que não consegue lidar com a quantidade produzida de *PET* no formato de garrafas que é cerca de ~9% das ~430 milhões de toneladas de plástico produzidas por ano. Esta quantidade é significativamente grande quando pensado em volume, pois as garrafas são finas mais volumosas o que piora ainda mais o efeito acumulativo. Cada garrafa de *PET* precisa de ~200 anos na melhor hipótese e ~600 anos na pior hipótese, seja como for é muito maior do que a vida humana.

Uma solução para o reaproveitamento das garrafas em *PET* são os projetos de extrusoras de filamento reciclado a partir do derretimento de garrafas *PET* para uso em impressoras 3D do tipo *FDM*. O processo usa as garrafas na forma de fitas que cortadas e limpas passam por uma extrusora que derrete o plástico *PET* e os conforma em filamentos de diâmetro de ~1,75mm, no qual pode ser utilizado para diversos fins, incluindo peças que deixariam de utilizar *PET* novo, e desta forma, reduzindo expressivamente a quantidade de garrafas que acabam sendo descartadas para lixo comum (ANDERSON, 2017; MONTENEGRO *et al.*, 2020; MIKULA *et al.*, 2021; KOSCHEVIC e BITTEM COURT, 2016).

O processo de extrusão do *PET* na forma de fitas, apesar de simples, é muito lento para uma produção amadora do tipo “caseira”. O mesmo poderia ser ampliado para um processo industrial automatizado e de produção significativa, o que de fato poderia ser uma boa solução para o reaproveitamento e a sustentabilidade de parte do plástico *PET* que hoje é jogado no lixo e que acabam por poluir e contaminar os oceanos.

Na Figura 12 é possível observar o reaproveitamento do plástico de garrafas *PET* em uma extrusora simples de filamento para impressão 3D. Note que o *PET* é inserido na extrusora na forma de uma fita plana (tiras).

Figura 12 – Reaproveitamento de plástico *PET* de garrafas em filamentos para impressão 3D.



Fonte: Adaptado de *ElectroNoobs* (2023).

Para adotar a forma de produção reciclada de garrafas *PET* é necessário cumprir quatro importantes etapas, que vão desde a separação das garrafas, limpeza, produção de filamentos e sua utilização em impressoras 3D, como pode ser observado na Figura 13.

Figura 13 – Ciclo completo de reciclagem das garrafas *PET* para produção de filamentos 3D.



Fonte: Adaptado de *BiocraftLab* (2023).

Como toda a tecnologia envolvida na utilização de plásticos impressos em 3D, não parece ser difícil adotar não só uma solução industrializada para o reaproveitamento das garrafas *PET* como filamentos 3D, mas também as aplicações “caseiras” no qual pessoas comuns em suas residências, ou em em laboratórios do tipo *Maker* em faculdades e universidades mundo afora poderiam começar esta tarefa importante de redução de garrafas jogadas no lixo, sendo devidamente reaproveitadas em diversos projetos acadêmicos e/ou particulares, ainda muito antes da consciência industrial. Isso possibilitaria a demanda e a redução de preços dos filamentos tradicionais que utilizam outros tipos de plásticos.

Uma abordagem também interessante é o reaproveitamento do plástico do tipo *PLA* (Ácido Polilático) (ZHAO *et al.*, 2018; SASSE *et al.*, 2022; ONG *et al.*, 2020). Diferentemente

do impacto massivo do plástico *PET*, o plástico de *PLA* apesar de ser insignificante na quantidade quando comparado a utilização do *PET*, este pode também ser reaproveitado de forma similar via uma extrusora para a fabricação de novos filamentos 3D. Este tipo de plástico é muito comum na fabricação de peças via a técnica 3D *FDM*, e também acaba por ser descartado quando uma impressão falha, ou quando uma peça é apenas utilizada como um protótipo o que leva a obsolescências de uso (MIKULA *et al.*, 2021; PAKKANEN *et al.*, 2017; BABAGOWDA *et al.*, 2018; BREŠKI *et al.*, 2021; CRUZ SANCHEZ *et al.*, 2015; SHANMUGAM *et al.*, 2020). O reaproveitamento destas peças pode evitar consumo de novos filamentos não reciclados e diminuir o impacto no descarte.

É possível perceber que a manufatura aditiva possibilita diversos tipos de sustentabilidade, desde economia de matéria-prima, de energia elétrica, de consumo e com a reciclagem de matéria-prima permite alcançar a diminuição do descarte desnecessário do plástico de garrafas *PET*.

4 PERSPECTIVAS FUTURAS

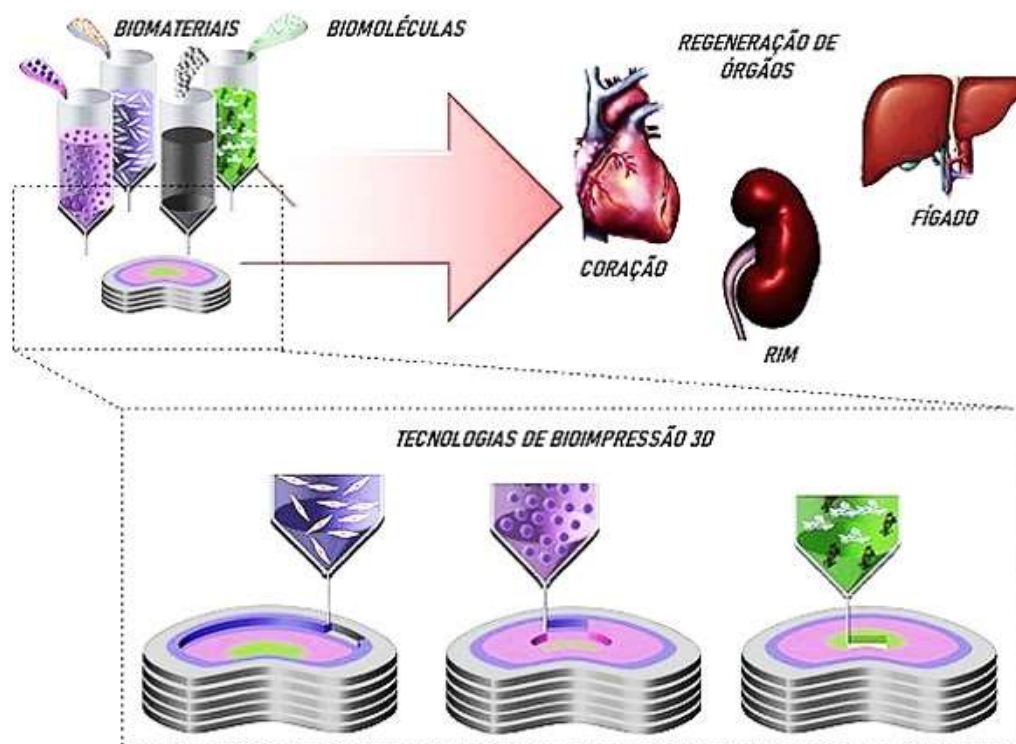
Uma grande expectativa para a manufatura aditiva se concentra no desenvolvimento de máquinas e técnicas que permitam realizar de forma sustentável, a produção de biomateriais ou biomoléculas capazes de serem arranjados de tal forma a permitir a construção de órgãos funcionais biológicos, tecido, osso, fibras musculares, entre outros (HUSSAIN e BUTCHER, 2018).

As pesquisas conduzidas neste ramo da ciência avançam fortemente e possuem um incrível potencial econômico e social. Fazer uso de transplantes de órgãos com suas próprias células permite eliminar a rejeição após a cirurgia. O organismo interpreta o órgão impresso em 3D como sendo parte integrante do mesmo organismo (DURFEE e IAIZZO, 2019).

O projeto de partes humanas para substituição, serão complexos, muito valiosos, e eliminaram as filas de transplantes. Pessoas podem desde muito jovem se programar para fabricar alguns órgãos, e armazenar para o futuro conforme for necessário, prolongando a vida (GAO *et al.*, 2015; GUO *et al.*, 2013).

Na Figura 14 é possível observar uma ilustração da utilização de biomateriais e biomoléculas em compostos para impressão 3D na fabricação de órgãos de diferentes tipos e funções. Cujo crescimento é iniciado pela participação de tecnologias de bioimpressão 3D, no qual a estrutura deverá ser composta por partes diferentes de biomateriais com funções próprias para crescimento de diferentes partes para compor diferentes órgãos.

Figura 14 – Avanços em impressão 3D de tecidos vivos para formação e regeneração de diferentes órgãos com diferentes biomateriais e biomoléculas.



Fonte: Adaptado de Durfee e Iaizzo (2019).

A manufatura de biomateriais será uma quebra de paradigma quando se tornar usual, visto as proporções inusitadas desta tecnologia na substituição de partes humanas, quer seja por doenças, fadiga ou envelhecimento natural. Resta apenas saber como será o acesso a esta tecnologia para que possa ser utilizada de forma parcimoniosa entre a sociedade, sem que venha a privilegiar apenas uma determinada classe social.

Novas formas de conduzir a manufatura vão a caminhos inesperados, quase beirando o limiar da ficção científica. Tal como fabricar seus próprios órgãos e/ou reparar órgãos em uso via cirurgias de reconstituição *in loco*. Haverá um tempo em que estes serão procedimentos normais provavelmente dentro de algumas dezenas de anos. O nível de sustentabilidade da vida humana poderá alcançar patamares inesperados, com pessoas vivendo indefinidamente, o que de fato agravará a situação do crescimento populacional e da limitação de recursos disponíveis no planeta.

Estas preocupações fazem com que a ciência comece a pensar em como tornar os materiais utilizados mais atrativos, de tal forma que possam exercer funções automáticas conforme alguns estímulos externos, e desta forma, se modificar e se alterar para que possa exercer uma determinada função pré-definida capaz de atuar como uma pequena máquina.

Estímulos do ambiente podem atuar como gatilhos para que o comportamento seja como projetado e esperado a cada estímulo presente.

A construção com materiais diferentes e sensíveis a estímulos foram batizados de materiais de manufatura aditiva 4D. Na verdade o 4D é a função de movimentação automática dado um estímulo do ambiente, ou seja, são de fabricação 3D e ganham mais 1D quando utilizam de materiais sensíveis a estímulos físicos (meta-materiais), que tornam a impressão 3D em 4D. Para que isso ocorra, devem ser utilizados materiais sensíveis à luz, umidade, eletricidade, magnetismo, ações mecânicas, entre tantos outros.

Na Figura 15 é possível notar a diferença que existe entre um dispositivo puramente 3D de um dispositivo do tipo 4D com materiais considerados “inteligentes” que se deformam e movimentam sob determinadas condições físicas (temperatura, umidade, pH, campo magnético, campo elétrico e luminosidade).

Figura 15 – Impressão 4D com materiais “inteligentes”

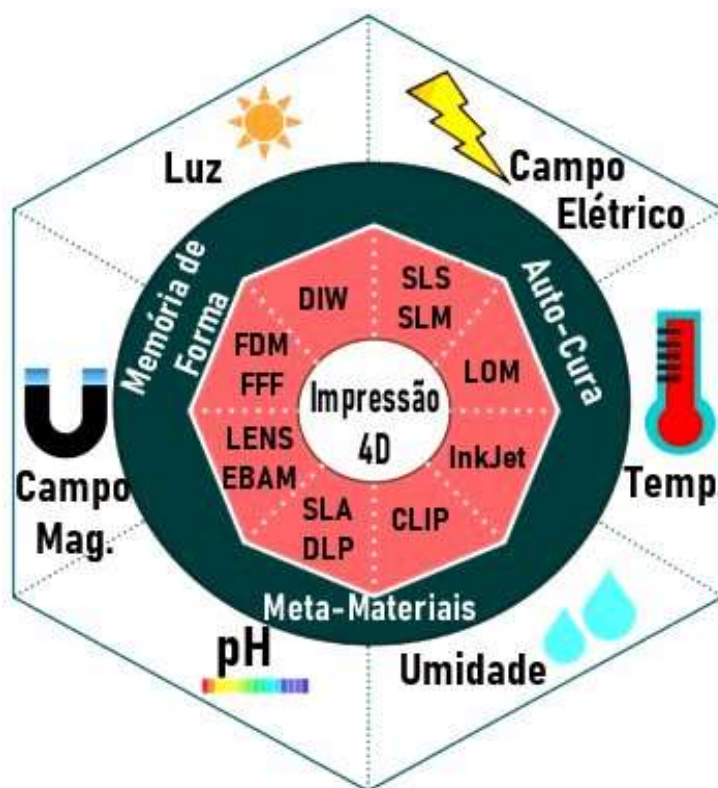


Fonte: Adaptado de Zafar e Zhao (2020).

Alguns meta-materiais, podem ser sensíveis a campo magnético, elétrico, umidade, temperatura (quente ou fria), espectro luminoso (cores visíveis, ultravioleta, infravermelho, nucleares, entre tantos outros) e químicos (condutividade, pH, solubilidade, entre outros).

Como pode ser visto na Figura 16, a impressão 4D com materiais inteligentes (com memória, auto-curáveis e/ou metamorfos) capazes de deformam/movimentam sob determinadas condições físicas (estímulos). Tais como: temperatura, umidade, pH, campo magnético, campo elétrico, ação mecânica e luminosidade.

Figura 16 – Impressão 4D com materiais



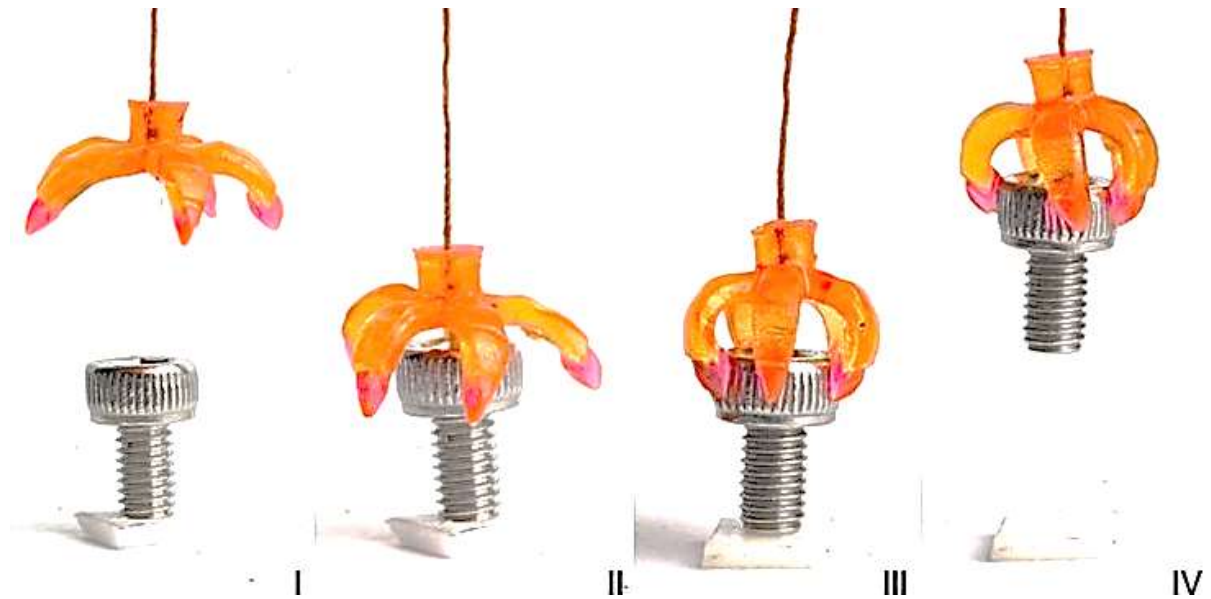
Fonte: Adaptado de Ryan *et al.*, (2021).

Note que na Figura 16, são apresentadas também as principais técnicas de impressão 3D que se adaptam para a utilização de materiais 4D para diversos tipos estímulos ambientais ou controlados (ZAFAR e ZHAO, 2020; RYAN *et al.*, 2021).

Em um futuro não distante, os materiais usuais e reaproveitados de reciclagem podem ser misturados com compostos que tornam os materiais do tipo meta-materiais, aptos e sensíveis a determinados tipos de estímulo. Possibilitando assim, aumentar o reuso e a sustentabilidade de determinados materiais, como o plástico (HALEEM *et al.*, 2021).

Nas Figura 17, 18, 19 e 20 podem ser vistos exemplos de meta-materiais sensíveis a estímulos térmicos, mecânicos e magnéticos nos quais mostram o enorme potencial de utilização futura, aumentando ainda mais a sustentabilidade obtida com a manufatura aditiva (GE *et al.*, 2017).

Figura 17 – Impressão 4D com meta-materiais do tipo borracha capazes de se movimentar com pulso térmico (estímulos) segurando um parafuso.



Fonte: Adaptado de Ge *et al.*, (2017).

Figura 18 – Impressão 4D mesa de madeira programada para se armar/montar com ação mecânica via meta-materiais.



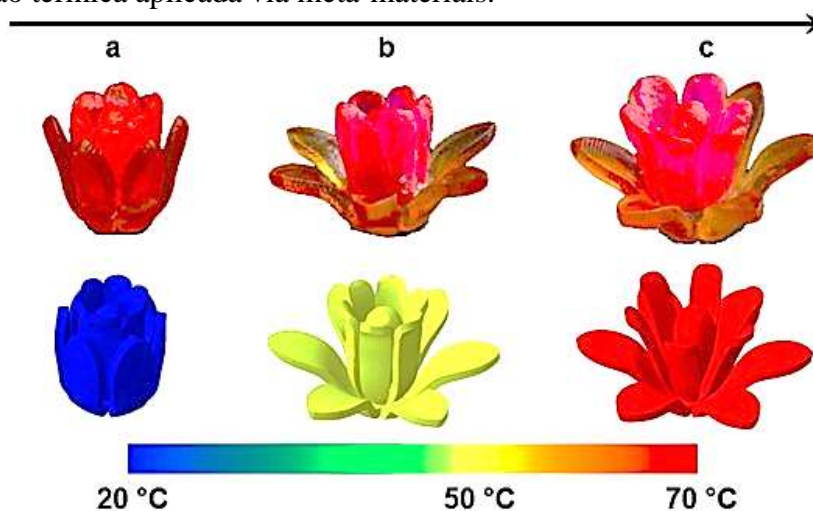
Fonte: Adaptado de *MIT Self-Assemble* (2015).

Figura 19 – Impressão 4D micro robô de meta-material do tipo magnético com ação mecânica de movimento obtida via campo magnético.



Fonte: Adaptado de *MIT Self-Assemble* (2015).

Figura 20 – Impressão 4D programada para se abrir ou se fechar, similar a uma flor real, com ação térmica aplicada via meta-materiais.



Fonte: Adaptado de Ge *et al.*, (2017).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

É fato relevante a importância dos plásticos na vida moderna, na construção de peças e dispositivos do dia-a-dia, além é claro das ferramentas e utensílios utilizados em alimentos e outros recipientes ou receptáculos para alimentos e bebidas. Porém a sombra do uso dos plásticos recai na necessidade de tornar seu uso sustentável para não virar uma solução técnica com diversos problemas intrínsecos de cunho ambiental na utilização da tecnologia.

Não resta dúvida que a manufatura aditiva pode levar a humanidade a um outro patamar de sustentabilidade, e na sua forma mais ampla, quer seja com a preocupação ambiental, quer seja com formas de prolongar a vida humana com o reparo ou a fabricação de novos órgãos, quer seja com soluções inovadoras e pouco convencionais como a manufatura 4D.

Em um futuro não muito distante, a humanidade se quer vai se dar conta da revolução que vive hoje com a manufatura aditiva, e que naturalmente será parte integrante do dia-a-dia possibilitando explorar de forma mais consciente o ambiente e os recursos naturais disponíveis na natureza e agredindo menos o planeta.

REFERÊNCIAS

ALCALDE, E., WILTGEN, F., Estudo das Tecnologias em Prototipagem Rápida: Passado, Presente e Futuro. **Revista de Ciências Exatas Universidade de Taubaté**. v.24(02), p.12-20, 2018.

ANDERSON, I., Mechanical Properties of Specimens 3D Printed with Virgin and Recycled Polylactic Acid. **3D Print Additive Manufacturing**. v.4(02), p. S110–S115, 2017.

MONTENEGRO, M., VIANNA, M., TELES, D.B. **Atlas do Plástico**. Fundação Henrich Böll Stiftung, 2020. p.64

AWAJA, F., PAVEL, D. Recycling of PET. **European Polymer Journal**, Elsevier, v.41(07), p.1453–1477, 2005.

BABAGOWDA, K., MATH, R.S., GOUTHAM, R., SRINIVAS, K.R., Study of Effects on Mechanical Properties of PLA Filament which is blended with Recycled PLA Materials. **IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.** v.10, p.12103, 2018.

BREŠKI, T., HENTSCHEL, L., GODEC, D., ĐURETEK, I., Suitability of Recycled PLA Filament Application in Fused Filament Fabrication Process. **Teh. Glas.** v.15, p.491–497, 2021.

CHONG, S., PAN, G.T., KHALID, M., Physical Characterization and Pre-assessment of Recycled High-Density Polyethylene as 3D Printing Material. **J. Polym. Environ.** v.25, p.136–145, 2017.

COLORADO, H.A., VELÁSQUEZ, E.I.G, MONTEIRO, S.N., Sustainability of Additive Manufacturing: The Circular Economy of Materials and Environmental Perspectives. **Journal of Materials Research and Technology**. v.9(4), p.8221–8234, 2020.

COMENALE, W., WILTGEN, F. Automação Industrial para a Manufatura Avançada com Apoio da Engenharia de Sistemas & Requisitos. **11º COBEF 2021 - Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação**, Curitiba, 24-26 de maio, p.1-8, 2021.

CRUZ SANCHEZ, F., LANZA, S., BOUDAUD, H., HOPPE, S., CAMARGO, M., **Polymer Recycling and Additive Manufacturing in an Open Source context**: Optimization of processes and methods. Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium-An Additive Manufacturing Conference, Austin, 10–12 August, 2015.

DURFEE, W.K., IAIZZO, P.A. Chapter 21 - Medical Applications of 3D Printing. **Engineering in Medicine, Advances and Challenges**. p.527-543, 2019.

FORMIGONI, A., SANTOS, S.C., MEDEIROS, B.T., Logística Reversa e Sustentabilidade para a Melhoria da Cadeia: Uma Abordagem no Panorama da Reciclagem PET no Brasil. **Revista Metropolitana de Sustentabilidade**. v.4(03), p.108–125, 2014.

GAO, W., ZHANG, Y., RAMANUJAN, D., RAMANI, K., CHEN, Y., WILLIAMS, C.B., WANG, C.C.L., SHIN, Y.C., ZHANG, S., ZAVATTIERI, P.D., The Status, Challenges, and Future of Additive Manufacturing in Engineering. **Computer-Aided Design**. v.69, p.65-89, 2015.

GE, Q., SAKNAER, A.H., LEE, H., DUNN, C.K., FANG, N.X., DUNN, M.L., Multimaterial 4D Printing with Tailorable Shape Memory Polymers. *Nature*. **Scientific Reports**. v.6(31110), p.01-11, 2017.

GOMES, J., WILTGEN, F., Avanços na Manufatura Aditiva em Metais: Técnicas, Materiais e Máquinas. **Revista Tecnologia**. v.41(01), p.1-16, 2020.

GUO, N., MING C., LEU, M.C., Additive Manufacturing: Technology. Applications and Research Needs. **Front. Mech. Eng.**, p.1-30, 2013.

HALEEM, A., JAVAID, M., SING, R.P., SUMAN, R., Significant Roles of 4D Printing Using Smart Materials in the Field of Manufacturing. **Advanced Industrial and Engineering Polymer Research**. v.4, p.301-311, 2021.

HUSSAIN, Y., BUTCHER, J.T., Chapter 9 - **Bioprinting Cardiovascular Organs**. 3D Printing Applications in Cardiovascular Medicine. p.163-187, 2018.

HWANG, D., LAUFF, C., PEREZ, K.B., CAMBURN, B.A., WOOD, K.L., Comparing the Impacts of Design Principles for Additive Manufacturing on Student and Experienced Designers. **International Journal of Engineering Education**. v.36(06), p.1862-1876, 2020.

JAVAID, M., HALEEM, A., SINGH, R. P., SUMAN, R., RAB, S., Role of Additive Manufacturing Applications Towards Environmental Sustainability. **Advanced Industrial and Engineering Polymer Research**. v.4, p.312–322, 2021.

KOSCHEVIC, M.T., BITTEM COURT, P.S., Meio Ambiente e Materiais Poliméricos: Breves Considerações com Ênfase ao Politereftalato de Etileno (PET) e Processos de Degradação. **Revista Eletrônica Científica Inovação e Tecnologia – RECIT**. v.2(14), p.60–80, 2016.

LOPES, M., TAMANINI C., WILTGEN, F., CRUZ F. A Importância das Simulações na Manufatura Aditiva de Moldes Mecânicos. **Revista Mundi**, aguardando publicação, p.1-24, 2022.

MIKULA, K., SKRZYPCZAK, D., IZYDORCZYK, G., WARCHOL, J., MOUSTAKAS, K., CHOJANACK, K., WITEK-KROWIAK, A., 3D Printing Filament as a Second Life of Waste Plastics - A Review. **Environmental Science and Pollution Research**. v.28. p.12321–12333, 2021.

NASCIMENTO, C.R., TRINDADE, G.A., SILVA, R.J.O., Sustentabilidade na Manufatura Aditiva: Uma Visão Geral sobre os Potenciais do seu Desenvolvimento. **XI Congresso Brasileiro de Eng. Produção**. Paraná. 01-03 de dezembro, p.01-10, 2021.

NGUYEN, N.A., BARNES, S.H., BOWLAND, C.C., MEEK, K.M., LITRELL, K.C., KEUM, J.K., NASKAR, A.K., A Path for Lignin Valorization Via Additive Manufacturing of High-Performance Sustainable Composites with Enhanced 3D printability. **Science Advances**. v.4, p.01-15, 2018.

ONG, T., CHOO, H.L., CHOO, W., KOAY, S.C., PANG, M., Recycling of Polylactic Acid (PLA) Wastes from 3D Printing Laboratory. **Advances in Manufacturing Engineering**. Springer, Singapore. p.725–732, 2020.

PAKKANEN, J., MANFREDI, D., MINETOLA, P., IULIANO, L., About the Use of Recycled or Biodegradable Filaments for Sustainability of 3D Printing. **International Conference on Sustainable Design and Manufacturing**, Bologna, Italy, 26–28 April, p.776–785, 2017.

RYAN, K.R., DOWN, M.P., BANKS, C.E., Future of Additive Manufacturing: Overview of 4D and 3D Printed Smart and Advanced Materials and their Applications. **Chemical Engineering Journal**. v.403(01), p.126162, 2021.

SASSE, J., PELZER, L., SCHÖN, M., GHADDAR, T., HOPMANN, C., Investigation of Recycled and Coextruded PLA Filament for Additive Manufacturing. **Polymers**. v.14, p.2407-2424, 2022.

SHANMUGAM, V., DAS, O., NEISIANY, R.E., BABU, K., SINGH, S., HEDENQVIST, M.S., BERTO, F., RAMAKRISHNA, S., Polymer Recycling in Additive Manufacturing: An Opportunity for the Circular Economy. **Mater. Circ. Econ.** v.2, p.11, 2020.

TAMANINI, C., WILTGEN, F. Manufatura Aditiva e as Mudanças na Indústria Automotiva. **Revista Eletrônica Científica Inovação e Tecnologia - RECIT**. v.13, p.104-118, 2022.

WILTGEN, F., ALCALDE, E., Prototipagem Rápida Aditiva Aplicada em Dispositivos Funcionais de Auxílio Humano. **Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação - COBEF**. São Carlos, 05-07 de agosto, p.1-5, 2019.

WILTGEN, F., Protótipos e Prototipagem Rápida Aditiva - Sua Importância no Auxílio do Desenvolvimento Científico e Tecnológico. **Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação - COBEF**. São Carlos, 05-07 de agosto, p.1-5, 2019.

WILTGEN, F. A Manufatura Avançada Precisa de uma Engenharia Avançada. **Revista Tecnologia**. v.41(02), p.1-11. 2020A.

WILTGEN, F., Técnicas de Ensaio de Sistemas Complexos com Metodologia de Engenharia de Sistemas & Requisitos. **Interfaces Científicas – Exatas e Tecnológicas**. v.4(01), p.51-60, 2020B.

WILTGEN, F., Manufatura Aditiva Via Impressão 3D. Seminário V Semana de Tecnologia da FATEC de Bauru. **Research Gate**. Bauru, 29 de outubro, p.01-86, 2021A.

WILTGEN, F., Testing Plan in System & Requirements Engineering for Strategic Engineering Areas. **International Congress of Mechanical Engineering (26° COBEM)**. Florianópolis. November, 22-26., p.1-11. 2021B.

WILTGEN, F., Protótipos e Prototipagem Rápida Aditiva - Sua Importância no Auxílio do Desenvolvimento Científico e Tecnológico. Engenharia - Construção de Conhecimentos (ISBN: 978-65-84599-44-4). **Uniesmero**. Cap.3, p.36-47, 2022A.

WILTGEN, F., Fabricação de Protótipos para Testes Experimentais. **Revista de Engenharia e Tecnologia**. v.14(02), p.09-22, 2022B.

WILTGEN, F., Prototypes are Important. **Transformation**. v.4(115), p.109-125, 2022C.

WILTGEN, F., Uma Sociedade Sustentável Baseada no Uso da Manufatura Aditiva. Seminário **18ª Congresso Científico da FHO de Araras**. Research Gate. Araras, 30 de maio, p.01-101, 2023.

ZAFAR, M.Q, ZHAO, H., 4D Printing: Future Insight in Additive Manufacturing. **Metal and Material International**. v.26, p.564-585, 2020.

ZHAO, P., RAO, C., GU, F., SHARMIN, N., FU, J., Close-looped Recycling of Polylactic Acid used in 3D Printing: an Experimental Investigation and Life Cycle Assessment. **J. Clean Prod.** v.197(01), p.1046–1055, 2018.