

MANUFATURA ADITIVA EM METAIS – LEVE, FORTE E INOVADOR

Filipe Wiltgen - Universidade de Taubaté

E-mail: LFWBarbosa@gmail.com ou Filipe.Wiltgen@unitau.br

Resumo: Este artigo apresenta a evolução da construção de peças, partes e sistemas completos através do processo de manufatura aditiva em metais. Observa como a indústria tradicional se prepara para esta evolução competitiva, no qual as empresas do setor de aeronáutica e espaço tem feito uso nos últimos anos, e obtendo resultados significativos na fabricação de itens de grande valor agregado e tornando-os mais leves e economizando matéria-prima nobre, mais fortes melhorando sua confiabilidade e durabilidade, e inovando a forma de projetar e desenvolver novos produtos possibilitando explorar melhor os avanços na manufatura aditiva em metais.

Palavras-chave: Manufatura Aditiva, Metais, Impressão 3D.

ADDITIVE METAL MANUFACTURE - LIGHT, STRONG AND INNOVATIVE

Abstract: This paper presents the evolution of construction of parts, parts and complete systems through process of additive manufacturing in metals. Observe how traditional industry prepares itself for this competitive evolution, in which companies in aeronautics and space sector have made use of in recent years, and obtaining significant results in manufacture of items of great added value and making them lighter and saving material noble raw materials, stronger, improving their reliability and durability, and innovating way to design and develop new products making it possible to better exploit advances in additive manufacturing in metals.

Keywords: Additive Manufacturing, Metals, 3D Printing.

1. Introdução

Com o surgimento das primeiras peças fabricadas em manufatura aditiva em termoplásticos e polímeros, aguardava-se ansiosamente o surgimento do mesmo processo em metais. A possibilidade de fabricar uma peça metálica sem o processo de usinagem tradicional via a manufatura subtrativa, parecia algo não só inovador, mas que traria uma profunda mudança nos custos, nos prazos e na forma de se projetar e de construir peças utilizando metais (ATTARAN, 2017; DUDA *et al.*, 2017).

Apesar de lenta a mudança na construção da indústria de metal, dado principalmente pelos custos e investimentos necessários, e também, pelo próprio amadurecimento da tecnologia e dos fornecedores (GARDAN, 2016), a revolução das indústrias tradicionais ainda não evoluiu como esperado. Ao contrário do setor de aeronáutica e espaço que percebeu uma grande oportunidade de mudança e de economia neste setor (BARROQUEIRO *et al.*, 2019; BECEDAS *et al.*, 2018; GRADL *et al.*, 2018; KATZ-DEMYANETZ *et al.*, 2019; ZHANG *et al.*, 2019).

A indústria de aeronáutica e espaço, possui dois requisitos essenciais que direcionaram a manufatura aditiva em metais nos primeiros anos de seu surgimento, que foi a fabricação de peças muito complexas e difíceis de serem fabricadas, e em pequena escala, e também uso de matéria-prima de alto custo (GOMES; WILTGEN, 2020). A

utilização inicial e discreta de pequenas peças impressas em 3D utilizando metal, logo se transformou em uma profusão de peças de todos os tipos, e atualmente sistemas inteiros e de grande porte são construídos neste processo.

As agências espaciais e seus fornecedores, hoje conseguem construir em uma única peça, todo um sistema de propulsão motor-foguete de grande porte, com menor custo e a qualidade superior aos fabricados de maneira similar no processo tradicional (SINGAMNENI *et al.*, 2019; SACCO *et al.*, 2019; REI, 2018; PATEL *et al.*, 2019; ÖZSOY *et al.*, 2019; MULLER *et al.*, 2019; MILEWSKI *et al.*, 2017).

No final de 2019, a indústria naval foi surpreendida com a fabricação de um barco de pequeno porte inteiramente impresso em material composto pela Universidade do Maine nos EUA, o qual foi divulgado em todos os meios de comunicação. Apesar de ser construído em material composto, abriu espaço para que em breve possa ser utilizado metal, entre outros materiais.

A possibilidade de construir objetos completos, sem a necessidade de juntar partes, quer sejam soldadas ou aparafusadas, torna o processo de manufatura aditiva (GOMES; WILTGEN, 2020) em metais muito atrativo para a indústria de equipamentos complexos (HERDERICK, 2011; HERZOG *et al.*, 2016; LEWANDOWSKI *et al.*, 2016), inclusive com a possibilidade real de não precisar mais de um setor de montagens. A própria máquina que construir o objeto o fará de tal forma que as partes a serem montadas estejam devidamente colocadas em seus lugares e fixadas conforme projeto.

A futura integração de materiais diferentes em um mesmo projeto de impressão 3D, revolucionará a indústria automobilística (DILBEROGLU *et al.*, 2017; EROL *et al.*, 2016), no qual cada veículo será construído completamente em uma célula, desde a construção do chassi e de toda a estrutura metálica, aos estofados, bancos, motores, rodas, pneus, entre todos os outros inúmeros itens que compõe um automóvel atual (ALCALDE; WILTGEN, 2018). A linha de montagem desenvolvida por Hery Ford utilizada há décadas será descontinuada por obsolescência.

Muitas aplicações em manufatura aditiva utilizando metais deverão ter participação essencial em diversos tipos de processo construtivo, incluindo a confecção de circuitos elétricos e eletrônicos (WU *et al.*, 2015; CHU *et al.*, 2014), o que impacta também na otimização de espaço e integração completa com a aplicação de destino (SHAHRUBUDINA *et al.*, 2019). Os automóveis poderão ser beneficiados e ter seus circuitos elétricos, comumente chamados de chicotes elétricos composto por diversos cabos elétricos que interligam todos os componentes elétricos e eletrônicos nos veículos. Se impressos em 3D e alojado de forma mais inteligente, e em locais no qual podem diminuir o comprimento, o volume e a massa dos circuitos, podem trazer grande economia de energia e de peso não só nos automóveis, mas também, em muitos outros tipos de veículos elétricos (FERA *et al.*, 2016; NAZIR *et al.*, 2019).

A importância do metal nos processos construtivos humanos atuais é inquestionável e a dependência de metais na tecnologia moderna de fabricação por si só seria de grande interesse da indústria de manufatura metálica, tanto no processo de preparação da matéria-prima metálica para uso na indústria de transformação, quanto na própria transformação da matéria-prima metálica em peças utilizando metal na forma de pó quanto na forma de cordões, filamentos (arames) similares aos utilizados em processos de soldagem.

A humanidade será beneficiada com a inclusão de forma mais incisiva da utilização da

manufatura aditiva em metais, possibilitando uma redução de custos, redução de preços finais dos produtos e peças, redução dos processos de montagem, redução de consumo de matéria-prima, aumento da durabilidade, da confiabilidade e da criatividade em projetos inovadores.

2. Uma Nova Forma de Projetar e Construir Peças Metálicas

A manufatura aditiva utiliza uma ferramenta computacional do tipo *CAD*, capaz de modelar geometricamente uma peça com a finalidade de permitir melhorar seu desempenho, otimizando sua massa, sua rigidez e sua aparência final.

O modelo digital é fisicamente confeccionado por meio de uma máquina (impressora 3D) capaz de construir utilizando os eixos *X* (comprimento), *Y* (largura) e *Z* (altura), empilhando camada por camada do material utilizado para compor o objeto similar ao modelo digital projetado (WILTGEN, 2019).

Existem diversos tipos de materiais utilizados na manufatura aditiva, sendo os termoplásticos e compósitos os mais comuns materiais (ALCALDE; WILTGEN, 2018). O grande interesse desde que surgiu o processo de manufatura aditiva, era a evolução da tecnologia para permitir empregar neste novo processo de fabricação a utilização de metais (ATTARAN, 2017; DUDA *et al.*, 2017; BECEDAS *et al.*, 2018).

Metais ou quaisquer outros materiais em manufatura aditiva são formados pela sobreposição de camada por camada (Figura 1), ou seja, a composição do modelo físico real depende da inserção de matéria-prima, esse é o motivo deste processo se chamar aditivo devido a adição de material. A matéria-prima é adicionada na proporção necessária para a construção da peça conforme o modelo digital evitando desta maneira o desperdício de matéria-prima, que em muitos casos pode ter custo muito elevado, como metais raros, preciosos ou de tecnologia (GARDAN, 2016).

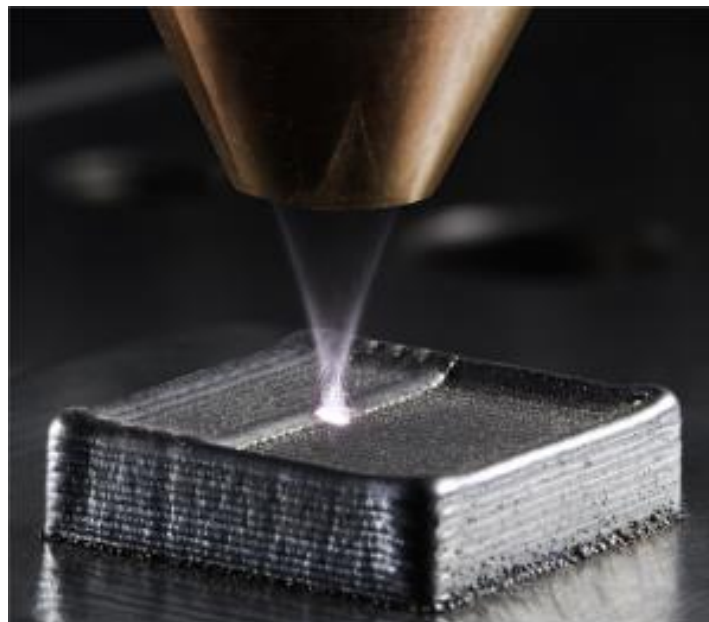


Figura 1 – Processo de Manufatura Aditiva em Metais.

Fonte: Frank Geyer (*Presentation TRUMPF Inc. Laser Technology Center - 2016*).

3. Peças Metálicas sem Emendas, Leves e Fortes

Uma das grandes vantagens na manufatura aditiva é a possibilidade de construir uma peça inteira sem a necessidade de emendas ou mesmo fixações, parafusos e encaixes. A construção de uma peça única possui vantagens inerentes aos custos finais de produção. Valores de montagens e componentes utilizados para realizar as montagens deixam de existir e seus custos também. Em alguns casos específicos, o projeto prevê que as peças sejam construídas sem emendas, em uma peça única (GOMES; WILTGEN, 2020).

Muitas pesquisas em manufatura aditiva utilizando metais tem como meta obter alívio de massa sem a perda da resistência mecânica necessária para a fabricação mantendo a confiabilidade, qualidade e funcionalidade das peças. Na Figura 2 é possível notar que a peça original em manufatura subtrativa.

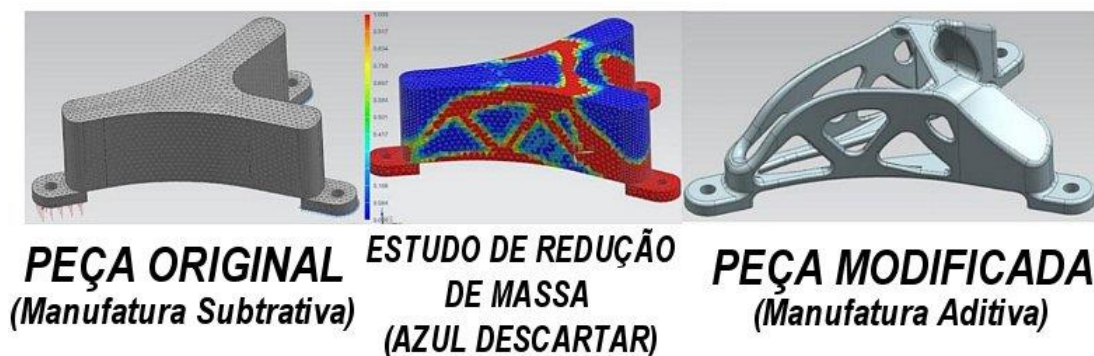


Figura 2 – Estudo de alívio de massa em peças com a manufatura aditiva.
Fonte: Adaptado de *3D Natives* (2018).

Esta análise serve para determinar a redução de massa, a parte em cor vermelha indica a estrutura essencial para que a peça seja resistente para cumprir sua função. A parte em cor azul é a parte da peça que pode ser removida sem prejudicar a estrutura física da mesma. Entretanto, para que uma peça possa ser construída no formato da estrutura física da análise (cor vermelha), é necessário utilizar a manufatura aditiva em metal, e desta maneira obter uma peça nova muito mais leve, e modificada conforme a análise de esforços mecânicos.

Na Figura 3 é possível observar a comparação entre a manufatura subtrativa e aditiva realizada para a fabricação de peças padrão em metal do tipo Titânio (5kg – 100 unidades). Deve ser notado que dada a complexidade construtiva aliada ao tipo de metal, existe substancial diferença no tempo de fabricação a favor da manufatura aditiva (18 dias) quando comparado a manufatura subtrativa (~40 dias). Menos da metade do tempo, seria possível construir mais que o dobro de peças em manufatura aditiva utilizando o mesmo período de tempo gasto pela manufatura subtrativa.

Isso impacta muito principalmente na produção de peças especiais e com material mais nobres. Fato é que com o tempo isso venha a ser verdade também na produção em larga escala de outros tipos de peças e materiais.

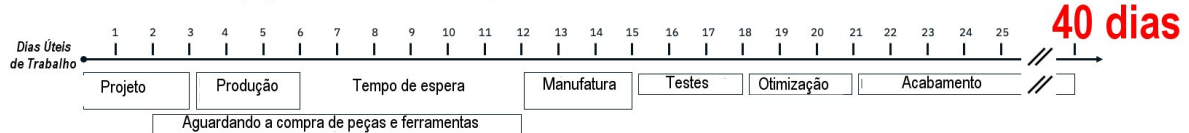
Manufatura Subtrativa (5kg de Titânio - 100 unidades)**Manufatura Aditiva (5kg de Titânio - 100 unidades)**

Figura 3 – Comparação entre a Manufatura Subtrativa e Aditivas em Titânio.

Fonte: Adaptado de *Alex Huckstep Digital Alloys* (2019).

A possibilidade de construir uma peça de forma diferente, impacta diretamente na complexidade e dificuldade de construção da mesma principalmente se fabricada na forma tradicional de manufatura (ATTARAN *et al.*, 2017). E desta forma, impacta também no tempo total de fabricação destas peças modificadas para obter o alívio de massa (LEWANDOWSKI *et al.*, 2016; GRADL *et al.*, 2018; FERA *et al.*, 2016; NAZIR *et al.*, 2019).

As pesquisas atuais mostram que os avanços obtidos na manufatura aditiva vão ao encontro da nova revolução industrial chamada de Manufatura Avançada (Indústria 4.0). As necessidades da Manufatura Avançada (DILBEROGLU *et al.*, 2017; EROL *et al.*, 2016; MEHRPOUYA *et al.*, 2019; HERZOG *et al.*, 2016, PEREIRA *et al.*, 2017; SACCO *et al.*, 2019) só serão amplamente obtidas com a observância das novas tecnologias disponíveis de fabricação, comunicação e integração da cadeia produtiva.

Mudanças na fabricação terão importância crucial na melhora dos resultados. Assim sendo, a nova revolução industrial só ocorrerá quando a implementação de máquinas de manufatura aditiva forem realidade nas fábricas.

4. Aplicações e Máquinas das Fábricas do Futuro

As fábricas deverão ser amplamente automatizadas, com sistemas de comunicação sem fio, operadas remotamente, com linha de produção por demanda, peças personalizadas na forma e nos materiais, entradas ou envios autônomos e máquinas operadas por máquinas, sem a presença humana. Parece ficção científica, mas não é, e também não vai demorar muito mais tempo para que estas tecnologias se aglutinem na nova revolução industrial (DILBEROGLU *et al.*, 2017; EROL *et al.*, 2016; MEHRPOUYA *et al.*, 2019; PEREIRA *et al.*, 2017).

O setor que mais têm empregado novas tecnologias é o de aeronáutica e espaço. Os desenvolvimentos de foguetes, propulsores, pequenos satélites, partes de aviões e helicópteros, têm sido construídos com a ajuda da manufatura aditiva em metais e suas características funcionais testadas ao extremo e seus resultados tem superado a forma tradicional de construção, no tempo, no custo e na qualidade (SACCO *et al.*, 2019; REI, 2018; PATEL *et al.*, 2019; ÖZSOY *et al.*, 2019).

As aplicações neste setor, tem sido desde pequenos fixadores de revestimentos internos de aeronaves comerciais, a partes importantes de estruturas de aviões militares de combate. Aeronaves não tripuladas (UAV – Unmanned Aerial Vehicle ou VANT – Veículo Aéreo Não Tripulado) possuem grande parte de suas estruturas e compartimentos fabricados em manufatura aditiva (SINGAMNENI *et al.*, 2019).

As agências espaciais e seus parceiros nos EUA, China e da Europa tem investido fortemente na operação e utilização de diversas máquinas modernas de manufatura aditiva tanto em metais, como em outros tipos de materiais (ABDULHAMEED *et al.*, 2019; ABOULKHAIR *et al.*, 2019; CHU *et al.*, 2014; DING *et al.*, 2015; GRADL *et al.*, 2018; MURR *et al.*, 2017; BARROQUEIRO *et al.*, 2019).

Na Figura 4 é possível observar o teste realizado com um motor foguete (propulsor) de veículos espaciais, no qual todas as partes são construídas via manufatura aditiva em metais, incluindo a câmara de combustão e tubeira (ZHANG *et al.*, 2019).

Enormes máquinas de manufatura aditiva em metais são utilizadas nestas pesquisas tecnológicas, como é o caso da máquina da empresa Relativity Space na Figura 5, destinada a construção de grandes peças para as agências espaciais e empresas espaciais americanas (SACCO *et al.*, 2019; YUSUF *et al.*, 2019).

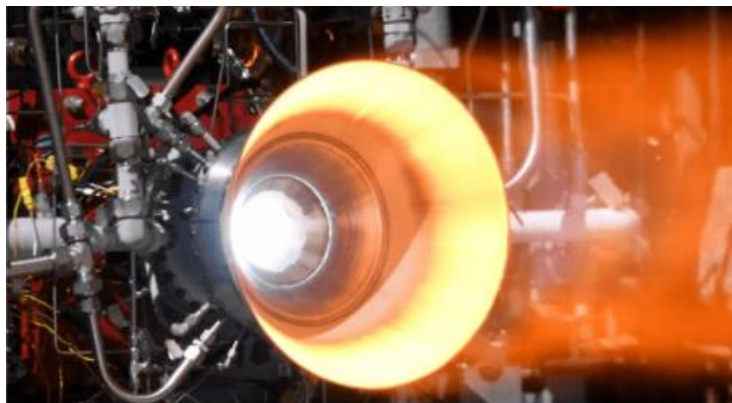


Figura 4 – Propulsor espacial em teste fabricado via manufatura aditiva em metal.
Fonte: NASA (2019).

Na Figura 5 é possível ver uma pessoa de 1,8m de altura próxima das estruturas e braços robóticos que compõe a máquina de manufatura aditiva em metais de componentes espaciais da Relativity Space. No futuro máquinas deste tipo deverão ser muito maiores que as atuais, isso para possibilitar a construção de toda uma secção de foguetes de apoio em decolagens (busters) e mesmo as cápsulas de transporte de tripulação e passageiros espaciais (KATZ-DEMYANETZ *et al.*, 2019).

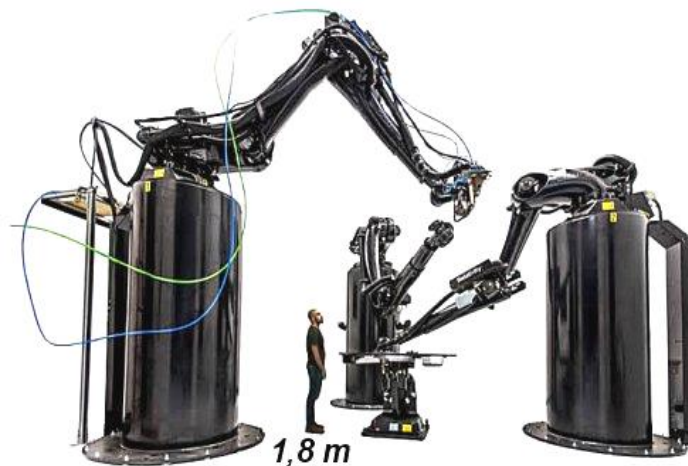


Figura 5 – Máquina de manufatura aditiva em metal para aplicação aeroespacial.
Fonte: Adaptado de *Relativity Space* (2019).

As fábricas do futuro próximo, munidas de todas tecnologias modernas, serão sem dúvida uma inovação bem vinda para a sociedade. A produção estará intimamente ligada a demanda em tempo real, assim como os parâmetros de fabricação dedicados e personalizados conforme a escolha de cada cliente, no tamanho, na cor, no material, na forma de entrega e no prazo (JIMÉNEZ *et al.*, 2019; GAUSEMEIER, 2013).

Na Figura 6 tem-se uma amostra de como deverão ser as partes principais de uma futura fábrica de Manufatura Avançada da próxima revolução industrial.

Nota-se a presença forte da manufatura aditiva como parte essencial na versatilidade de construção de peças personalizadas e ou de poucas unidades com uma das ferramentas que permitirão o sucesso deste modelo de indústria amplamente conectadas e com pouca ou nenhuma interferência humana na fabricação.

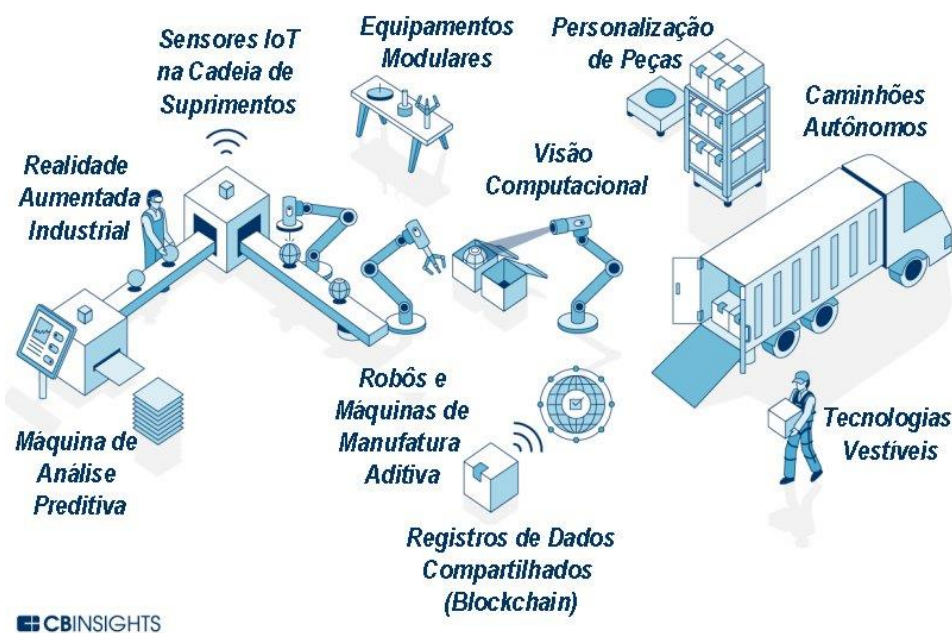


Figura 6 – Manufatura aditiva será essencial para as fábricas do futuro.
Fonte: Adaptado de *CBInsights* (2019).

Outro fator de grande importância é a possibilidade de se construir partes elétricas e eletrônicas integradas aos processos produtivos em manufatura aditiva (WU *et al.*, 2019). Isso porque em breve a construção de equipamentos eletro-eletrônicos deverão estar integrados aos meios construtivos, sem a necessidade de montagens extras. Além do que, se em um projeto os circuitos elétricos e eletrônicos estiverem integrados as partes estruturais construtivas, ambos serão beneficiados no volume e massa, e também, nas condições de trocas térmicas e de acesso para possíveis manutenções rotineiras.

Construir um equipamento eletro-eletrônico integrando a parte eletrônica a parte estrutural trará aos projetistas uma enorme possibilidade de aplicações até então não vislumbradas pelos projetistas em eletrônica.

Integrar os condutores elétricos, sensores, atuadores e sistemas de controle em conjunto a uma estrutura física mecânica permitirá aproveitar espaços que de outra forma seriam inacessíveis na construção tradicional. Impactando diretamente nos custos de fabricação e comercialização de diversos produtos.

Na Figura 7 é possível observar o esquema de um dispositivo das pesquisas realizadas pelo Prof. Wu e sua equipe (WU *et al.*, 2019) no desenvolvimento de componentes analógicos elétricos básicos impressos em 3D com uma máquina de manufatura aditiva em metal. Estes componentes analógicos elétricos básicos fazem parte da estrutura responsável por todos os componentes eletrônicos modernos.

A fabricação de resistores (responsáveis pelo consumo de energia elétrica transformando tensão e corrente elétricas em calor), indutores (responsáveis pelo armazenamento de energia elétrica dinâmica em campo magnético) e os capacitores (responsáveis pelo armazenamento de energia elétrica estática em campo elétrico) em manufatura aditiva é uma grande inovação para a indústria eletro-eletrônica.

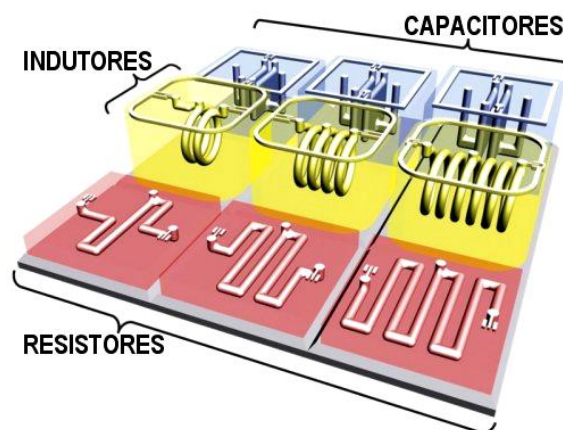


Figura 7 – Componentes elétricos básicos funcionais em 3D com manufatura aditiva.
Fonte: Adaptado de WU *et al.* (2015).

Isso abre caminho para a integração completa da manufatura aditiva permitindo imaginar e esperar grandes mudanças na engenharia, de forma muito diferente ao que tem ocorrido nas últimas décadas.

5. Integração Completa da Manufatura Aditiva no Futuro Próximo

O desenvolvimento das diversas técnicas novas de manufatura aditiva principalmente a fusão e utilização de diversos tipos de materiais diferentes na mesma máquina de impressão 3D (LEHMHUS *et al.*, 2018).

A integração de partes, peças, materiais e processos, unificados com sistemas de análise estruturais e de esforços mecânicos em tempo real poderão sugerir modificações importantes nos projetos de engenharia antes mesmo deles serem fabricados. Possibilitando reduzir a quantidade e assim os custos de protótipos funcionais até obter os resultados esperados (LEHMHUS *et al.*, 2018; HERDERICK, 2011; JIMÉNEZ *et al.*, 2019; GAUSEMEIER *et al.*, 2013; GARDAN, 2015).

A integração completa da manufatura aditiva permitirá alcançar níveis de maturidade tecnológica (TRL - *Technology Readiness Level*) e de maturidade em manufatura (MRL - *Manufacturing Readiness Level*) muito mais facilmente do que se obtém atualmente.

Na Figura 8 pode ser visto um exemplo de construção de um dispositivo composto por diversos tipos de materiais para sua confecção utilizando técnicas de manufatura aditiva. Nesse caso apenas para mostrar a capacidade de se construir uma peça complexa integrada na forma de uma réplica de um ser humano não funcional.

Uma máquina similar ao da Figura 8 quando for construída será chamada de *Synthetic Cyber-Droid* (Andróide Cibernético Sintético), ou seja, uma máquina robótica funcional complexa e totalmente integrada, com endo-esqueleto metálico ou de material composto, revestido por diversos sistemas e subsistemas, sistemas hidráulicos e pneumáticos, dispositivos microeletrônicos e microcontrolados, sensores em miniatura, diversos tamanhos de motores de magneto permanente de Terras Raras e construído completamente sem a necessidade de montagens. Impresso em 3D de uma única vez com a utilização de diversos tipos diferentes de matéria-prima unidos e construídos por uma mesma máquina de manufatura aditiva com intercambiamento de extrusores.

Máquinas mais simples e eletrodomésticos deste tipo deverão ser os primeiros a incorporar as novidades tecnológicas de integração ampla e completa de materiais e técnicas de manufatura aditiva integrada. É possível que a área médica também seja uma das primeiras a fazer uso desta técnica para projetar e construir partes humanas funcionais.



Figura 8 – Máquinas de Manufatura Aditiva de múltiplos tipos de materiais
Fonte: *PollyJet* (2019).

6. Discussão e Conclusões

A evolução das técnicas de manufatura tem influenciado constantemente o crescimento do conhecimento humano. É fato de que uma das fundamentais realizações humanas é o desenvolvimento das formas e dos processos de construir objetos com a finalidade clara de auxiliar no dia a dia. E assim, permitir aos seres humanos utilizar objetos para facilitar a realização de tarefas rotineiras.

A manufatura aditiva de uma forma geral é um dos caminhos para a realização da revolução industrial chamada de manufatura avançada, ou indústria 4.0.

Nesse contexto a manufatura aditiva em metais, é uma das principais realizações para que possam existir fábricas modernas capazes de realizar a produção industrial de uma forma mais integrada e inteligente.

Todos os avanços científicos realizados nos processos de manufatura possibilitam melhorar as formas de conduzir o desenvolvimento da sociedade e os grandes desafios da humanidade. A exploração espacial é o desafio que mais demanda novas tecnologias, por isso mesmo é a precursora em manufatura aditiva, de todos os tipos, e atualmente é o setor que mais explora e investe na manufatura aditiva. O setor aeronáutico também tem feito uso regular e progressivo na utilização da manufatura aditiva em metais, substituindo as formas tradicionais de fabricação.

A constante evolução construtiva permite avanços significativos em diversas áreas da ciência, e a manufatura aditiva integrada com múltiplos tipos de materiais, levará a forma de se construir uma peça, ou uma máquina completa e totalmente integrada na parte mecânica, elétrica, eletrônica, energética, hidráulica, pneumática, entre outros. Isso permitirá a construção de equipamentos mais complexos e inovadores, elevando muito o desenvolvimento humano.

Referências

ABDULHAMEED, O.; AL-AHMARI, A.; AMEEN, W.; HAMMAD MIAN, S.H., *Additive Manufacturing: Challenges, Trends, and Applications*. Recent Trends in Design and Additive Manufacturing, Adv. in Mechanical Engineering, v.11(02), pp.1-27, 2019.

ABOULKHAIR, N.T.; SIMONELLI, M.; PARRY, L.; ASHCROFT, I.; TUCK, C.; HAGUE, R., *3D Printing of Aluminium Alloys: Additive Manufacturing of T Aluminium Alloys Using Selective Laser Melting*. Progress in Mat. Science, v.106, pp.1-45, 2019.

ALCALDE, E.; WILTGEN, F., *Estudo das Tecnologias em Prototipagem Rápida: Passado, Presente e Futuro*. Revista de Ciências Exatas da Universidade de Taubaté (UNITAU), v.24 (2), 2018.

ATTARAN, M., *The Rise of 3-D Printing: The Advantages of Additive Manufacturing Over Traditional Manufacturing*. Bus. Horizons, v. 60, pp. 677-688, 2017.

BARROQUEIRO, B.; ANDRADE-CAMPOS, A.; VALENTE, R.A.F.; NETO, V., *Metal Additive Manufacturing Cycle in Aerospace Industry: A Comprehensive Review*. Journal Manufacturing Materials Processing, v.3(52), pp.1-21, 2019.

BECEDAS, J.; CAPARRÓS, A., *Additive Manufacturing Applied to the Design of Small Satellite Structure for Space Debris Reduction*. Conference Proceeding, Applications of Design for Manufacturing and Assembly, Mat. Science, pp.1-19, 2018.

CHU, W.-S.; KIM, C.-S.; LEE, H.-T.; CHOI, J.-O.; PARK, J.-I.; SONG, J.-H.; JANG, K.-H.; AHN, S.-H., *Hybrid Manufacturing in Micro/Nano Scale: A Review*. Int. J. Precis. Eng. Manuf. Technol., v.1, pp.75-92, 2014.

DILBEROGLU, U.M.; GHAREHPAPAGH, B.; YAMAN, U.; DOLEN, M., *The Role of Additive Manufacturing in the Era of Industry 4.0*. Procedia Manufacturing, v. 11, pp. 545-554, 2017.

DING, D.; PAN, Z.; CUIURI, D.; LI, H., *Wire-feed Additive Manufacturing of Metal Components: Technologies, Developments and Future Interests*. International Journal Advanced Manufacturing Technology, v.81(1-4), pp.465-481, 2015.

DUDA, T.; RAGHAVAN, L.V., *3D Metal Printing Technology*. IFAC, 49-29, pp.103-110, 2016.

EROL, S.; JÄGER, A.; HOLD, P.; OTT, K.; SIHN, W., *Tangible Industry 4.0: A Scenario-Based Approach to Learning for the Future of Production*. 6th CLF/CIRP Conference on Learning Factories, pp.13-18, 2016.

FERA, M.; FRUGGIERO, F.; LAMBIASE, A.; MACCHIAROL, R., *State of the Art of Additive Manufacturing: Review for Tolerances, Mechanical Resistance and Production Cost*. Congent Engineering, v.3, pp.1-16, 2016.

GRADL, P.; GREENE, S.E.; PROTZ, C.; BULLARD, B.; BUZZELL, J.; GARCIA, C.; WOOD, J.; COOPER, K., *Combustion Devices: A Summary of Process Developments and Hot-Fire Testing Results*. 54th AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, American Institute of Aeronautics and Astronautics, pp.1-35, 2018.

GARDAN, J., *Additive Manufacturing Technologies: State of the Art and Trends*. International Journal of Production Research, Taylor&Francis, pp.1-15, 2015.

GAUSEMEIER, J., *Thinking Ahead the Future of Additive Manufacturing*. Direct Manufacturing Reserach Center (DMRC), Exploring the Research Landscape Heinz Nixdorf Institute, University of Paderborn, pp.1-142, 2013.

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

JIMÉNEZ, M.; ROMERO, L.; DOMÍNGUEZ, I.A.; ESPINOSA, M.D.M.; DOMÍNGUEZ, M., *Additive Manufacturing Technologies: An Overview about 3D Printing Methods and Future Prospects*. Wiley Hindawi Complexity, pp.1-31, 2019.

HERDERICK, E., *Additive Manufacturing of Metals: A Review*. Materials Science and Technology, Columbus, Ohio, pp.16-20, 2011.

HERZOG, D.; SEYDA, V.; WYCISK, E.; EMMELMANN, C., *Additive Manufacturing of Metals*. Acta Materialia, v.117, pp.371-392, 2016.

KATZ-DEMYANETZ, A.; POPOV JR., V.V.; KOVALEVSKY, A.; SAFRANCHIK, D.; KOPTYUG, A., *Powder-bed Additive Manufacturing for Aerospace Application: Techniques, Metallic and Metal/Ceramic Composite Materials and Trends*. The emerging materials and processing technologies, Manufacturing Review, v.6(5), pp.1-14, 2019.

LEHMUS, D.; BUSSE, M.; VON HEHL, A.; JÄGLE, E., *State Additive of the Manufacturing: Art and Emerging From Trends Multi-Material in Processes to 3D printed Electronics*. MATEC Web of Conferences, ICEAF-V, v.188, 2018.

LEWANDOWSKI, J.J.; SELFI, M., *Metal Additive Manufacturing: A Review of Mechanical Properties*. Annu. Rev. Mater. Res., v.46, pp.151–86, 2016.

MEHRPOUYA, M.; DEGHANGHADIKOLAEI, A.; FOTOVVATI, B.; VOSOOGHNI, A.; EMAMIAN, S.S.; GISARIO, A., *The Potential of Additive Manufacturing in the Smart Factory Industrial 4.0: A Review*. Applied Sciences, v.9, pp. 1-34, 2019.

MILEWSKI, J.O., *Additive Manufacturing of Metals: From Fundamental Technology to Rocket Nozzles, Medical Implants, and Custom Jewelry*. First Edition, Ed. Springer, 2017. p.372.

MULLER, P.; RÜCKERT, G.; VINOT, P., *On the Benefits of Metallic Additive Manufacturing for Propellers*. Sixth International Symposium on Marine Propulsors smp'19, Rome, Italy, 2019.

MURR, L.E.; JOHNSON, W.L., *3D Metal Droplet Printing Development and Advanced Materials Additive Manufacturing*. Journal of Materials Research and Technology, v.6(1), pp.77–89, 2017.

NAZIR, A.; JENG, J.-Y., *A High-Speed Additive Manufacturing Approach for Achieving High Printing Speed and Accuracy*. Journal Mechanical Engineering Science, v.0(0), pp.1–9, 2019.

ÖZSOY, K.; DUMAN, B.; GÜLTEKİNA, D.I., *Additive Manufacturing of Liquid Rocket Engine. Metal Part Production with Additive Manufacturing for Aerospace and Defense Industry*, International Journal of Technological Sciences, v.11(03), pp.201-210, 2019.

PATEL, N.; STANDBRIDGE, S.; BERGHE, M.V.D.; DEVALARAJU, V., *Design and Additive Manufacturing Considerations for Liquid Rocket Engine Development*. AIAA Propulsion and Energy Forum, pp.1-44, 2019.

PEREIRA, A.C.; ROMERO, F., *A review of the meanings and the Implications of the Industry 4.0 Concept Developed*. Manufacturing Engineering Society International Conference 2017, MESIC 2017, 28-30 June 2017, Vigo (Pontevedra), Spain, 2017.

REI, M., *Rocket Engine Made by Additive Manufacturing*. IHI Engineering Review, v.51(02), pp.1-4, 2018.

SACCO, E.; MOON, S.K., *Additive Manufacturing for Space: Status and Promises*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v.105, pp.4123–4146, 2019.

SHHRUBUDINA, N.; LEEA, T.C.; RAMLAN, R., *An Overview on 3D Printing Technology: Technological, Materials, and Applications*. 2nd International Conference on Sustainable Materials Processing and Manufacturing (SMPM 2019), Procedia Manufacturing, v.35, pp.1286–1296, 2019.

SINGAMNENI, S.; LV, Y.; HEWITT, A.; CHALK, R.; THOMAS, W.; JORDISON, D., *Additive Manufacturing for the Aircraft Industry: A Review*. Journal of Aeronautics & Aerospace Engineering, v.8(01 215), pp.1-13, 2019.

YUSUF, S.M.; CUTLER,S.; GAO, N., *Review: The Impact of Metal Additive Manufacturing on the Aerospace Industry*. Metals, v. 9, pp.1-35, 2019.

WILTGEN, F., *Protótipos e Prototipagem Rápida Aditiva sua Importância no Auxílio do Desenvolvimento Científico e Tecnológico*. Anais do 10º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação (COBEF), São Carlos-SP, 2019.

WU, S.-Y.; YANG, C.; HSU, W.; LIN, L., *3D-Printed Microelectronics for Integrated Circuitry and Passive Wireless Sensors*. Microsystems & Nanoengineering, v.1 (15013), 2015.

ZHANG, X.; LIANG, E., *Metal Additive Manufacturing in Aircraft: Current Application, Opportunities and Challenges*. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, v.493, pp.1-7, 2019.