

# Impressão 3D na construção metálica

<https://doi.org/10.21814/uminho.ed.32.35>

Trayana Tankova<sup>1</sup>, Carlos Zhu<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidade de Coimbra, ISISE, Coimbra, 0000-0002-2764-0177

<sup>2</sup> Universidade de Coimbra, CEMMPRE, Coimbra, 0000-0001-6656-785X

## Resumo

Na era da internet e dos robôs, dispositivos sofisticados e simulação em tempo real, o setor da construção continua altamente dependente do trabalho manual. Por outro lado, o rápido desenvolvimento em áreas tecnológicas como robótica, computadores, sensores, programação, interfaces homem-máquina e inteligência artificial oferece um enorme potencial para aplicações recentes. A impressão 3D (fabrico aditivo) em metais, está a ficar popular em várias indústrias, no entanto existem vários assuntos que precisam de ser investigados. Este artigo apresenta um resumo das oportunidades e desafios na adoção do fabrico aditivo na construção metálica, descrevendo uma solução de fabrico aditivo adotado na Universidade de Coimbra e apresentando alguns casos de estudo já desenvolvidos através desta solução.

## 1. Introdução

Na era da quarta revolução industrial [1], o uso de diversas tecnologias, como robôs autônomos, inteligência artificial, realidade aumentada, fabrico aditivo (AM), simulação, internet das coisas (IoT), e *Big Data*, tem evoluído para a sua integração de forma a alcançar uma produção mais eficiente que poderá suportar a uma revolução na indústria da construção. No centro desta revolução são os dados, que fornecem informação sobre o que está a acontecer, que quando processados posteriormente, podem levar a uma análise descritiva sobre o que aconteceu no processo e/ou uma análise diagnóstica que ainda pode fornecer previsões com base na experiência existente. É neste contexto que a Indústria 4.0 oferece enormes benefícios para o futuro da fabricação e automação, principalmente ao considerar os vários desafios sociais e ambientais atualmente presentes.

No que diz respeito à indústria da construção, o fabrico aditivo apresenta soluções muito interessantes pela liberdade de forma e pela possibilidade de usar vários materiais de forma eficiente. Embora esta tecnologia tenha desenvolvimentos desde o início da década de 80 [2], ainda existem muitos problemas não resolvidos que dificultam a aplicação da impressão 3D em metal.

O processo usual de fabricação (AM) inclui um modelo CAD (*Computer-Aided Design*) que é um modelo 3D da peça desejada, geralmente no formato de arquivo STL. Este modelo é posteriormente processado por um software de *slicing*, que gera camadas a serem impressas passo a passo, que são então traduzidas para um formato aceite pela célula robótica (ex. código na linguagem do controlador lógico do robô) onde estão caracterizados os requisitos/parâmetros para a execução da estrutura [3].

Neste artigo são discutidos alguns problemas associados com a adoção mais corrente de fabrico aditivo na construção metálica, posteriormente é apresentada uma solução desenvolvida na Universidade de Coimbra e finalmente alguns exemplos, em forma de casos de estudo, são apresentados.

## 2. Fabrico aditivo em metais

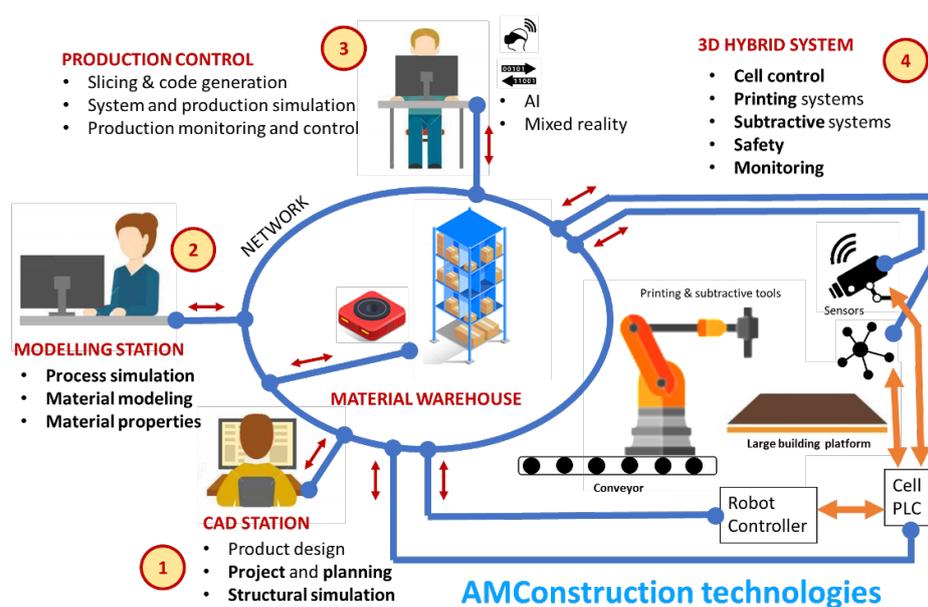
O fabrico aditivo de metal pode ser feito de várias maneiras, uma explicação detalhada no contexto da indústria de aviação é apresentada em [4]. Dentro de todas as técnicas disponíveis para a construção de aço, a mais adequada em termos de velocidade e dimensão é uma subcategoria de deposição por energia direta (DED) designada por Fabrico Aditivo por Soldadura por Arco Elétrico (*WAAM – Wire and Arc Additive Manufacturing*). Uma grande desvantagem deste processo, entretanto, é a qualidade do material final e as propriedades geométricas. Semelhante aos componentes soldados, os elementos fabricados por WAAM passam por um arrefecimento rápido que resulta na formação de defeitos internos, propriedades não homogêneas do material, tensões residuais e geometria distorcida [5]. Como a formação de tensões residuais depende da taxa de aquecimento-arrefecimento, as peças metálicas impressas em

3D dependem da sequência da sua construção [6] - [8], que ao mesmo tempo é um dos principais fatores no desenvolvimento de imperfeições. Consequentemente, o processo AM pode beneficiar com a otimização da orientação de deposição [9], [10]. A espessura das camadas, por exemplo, tem um impacto direto na precisão de execução para formas curvas e livres, que também podem ser otimizadas [11], [12]. Outra questão geométrica relacionada ao processo de deposição é o suporte de partes em consola - a peça inacabada está sujeita a um estado de tensão diferente da final, que pode resultar em rotura prematura. Além disso, ao construir com inclinação a execução pode ser problemática devido à orientação da tocha na produção automática e / ou a possibilidade de formação de poça de fusão líquida [13].

Melhorias adicionais do WAAM podem ser alcançadas com variantes de processo, tais como técnicas de maquinagem, aquecimento e / ou arrefecimento entre camadas, pré-aquecimento, entre outros [14]. As propriedades do material podem ser melhoradas pela incorporação de diferentes pós-tratamentos, como tratamento térmico e laminação a frio [15] e processos mais recentes como tratamento a laser [16].

### 3. Sistema e laboratório de fabrico aditivo na Universidade de Coimbra

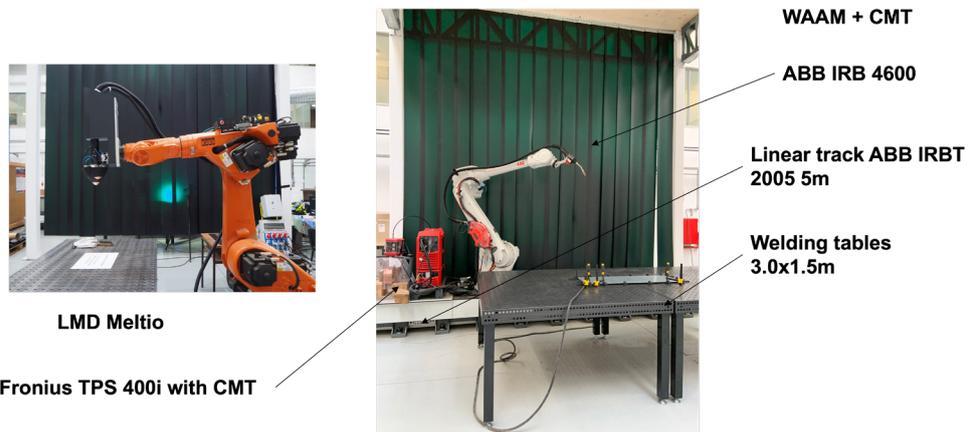
Uma nova instalação robótica inspirada pelas novas tecnologias e com o objetivo de ultrapassar os problemas existentes, está a ser desenvolvida na Universidade de Coimbra [17]. O sistema representado na Figura 1 engloba várias tecnologias da Indústria 4.0 que em combinação fornecem um sistema funcional para a aplicação na indústria de construção em aço. O sistema incorpora CAD, modelação de materiais, simulação de processos, e controle de produção pelo uso de diversos sensores num sistema inteligente de fabrico aditivo, onde as propriedades geométricas e materiais finais são ajustadas de acordo com as necessidades do projeto.



**Figura 1**  
Sistema de fabrico aditivo.

Para atingir os objetivos, o sistema desenvolvido (Figura 2) é equipado com: um ABB IRB 4600 (robô de uso geral otimizado para tempos de ciclo curtos) para tarefas WAAM, um eixo-externo ABB IRBT 2005 5m que permite uma área de trabalho maior; uma máquina de soldadura FRONIUS TPS 400i - CMT *Advanced* equipada com as mais recentes tecnologias de soldadura; diversos sensores para monitoramento da execução. O sistema ainda pode funcionar com o processo de deposição por laser – *Laser Metal Deposition* (LMD), onde é utilizado um robô Kuka (KR60-3) e uma ferramenta de deposição da *Meltio*.

O controle sobre as propriedades do material é feito com base nos parâmetros do processo - taxa de deposição do arame, corrente e voltagem do arco, alimentação do arame, pré-aquecimento, temperatura entre passes e velocidade da tocha. As ferramentas disponíveis atualmente permitem previsões baseadas em análises numéricas e utilização de experiência previa através de utilização de bases de dados e algoritmos inteligentes.



**Figura 2**  
Laboratório de fabrico aditivo na Universidade de Coimbra.

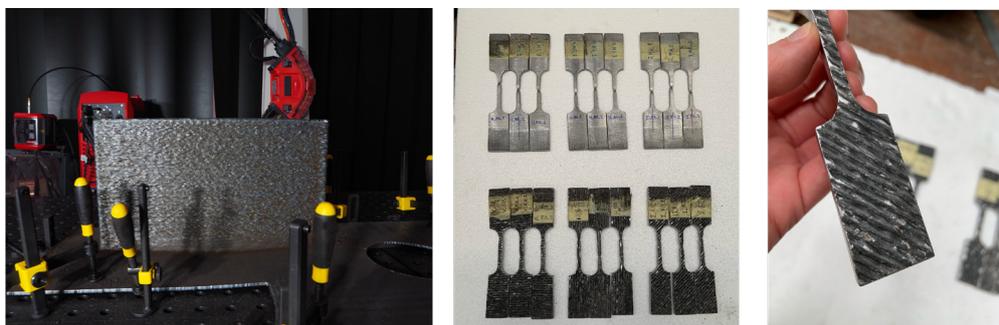
## 4. Casos de estudo

Foram desenvolvidos vários casos de estudo com os objetivos de validar e testar a utilização do sistema WAAM em diferentes cenários. Nesta fase, foram testadas as possibilidades de execução de formas diferentes. Numa fase posterior seriam comparados com os processos convencionais de fabrico.

### 4.1. Paredes e tubos

As paredes e os tubos foram produzidos com o objetivo de caracterizar as propriedades mecânicas do material depositado através de fabrico aditivo. Em ambos os casos, paredes e tubos, ficou claro que nos pontos de início e fim de soldagem, há uma concentração de imperfeições. Por isso foi adotada uma sequência aleatória para a determinação destes pontos. Uma parede está ilustrada na Figura 3, com as dimensões 500 mm x 300 mm e uma espessura de 8mm. A parede produzida com um

arame de aço carbono (AWS A5.18 ER70S-6) foi utilizada para provetes de ensaios de tração, onde foram feitos dois tipos de provetes – maquinados e não maquinados.



**Figura 3**  
Parede de aço carbono e provetes de ensaios de tração.

A outra linha de ensaios é focada na produção de secções de comprimentos pequeno, para determinar problemas de estabilidade global. Estes ensaios servem para estimativa da resistência da secção considerando as propriedades do material e as tensões residuais resultantes do processo aditivo. O objetivo será estabelecer a ligação entre os parâmetros da produção e a resistência final da secção.

Um exemplo é apresentado na Figura 4, onde um tubo cilíndrico oco produzido com aço carbono (AWS A5.18 ER70S-6) foi submetido a um ensaio à compressão.



**Figura 4**  
Tubo circular para ensaios de *stub-column*.

## 4.2. Conexões de geometrias

Outro tipo de casos de estudo foi a exploração de ligações entre geometrias, neste caso foram estudados a ligação entre dois tubos de secção constante e interligação entre três tubos com secção variável. Nestes casos de estudo ficou clara a importância de controlar a temperatura pela gestão do tempo entre camadas para conseguir evitar fusão indesejada e manter a qualidade da superfície.

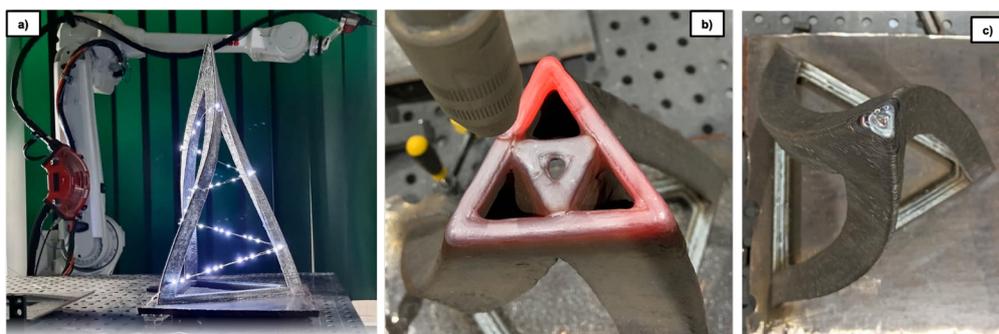


**Figura 5**  
Conexões.

### 4.3. Árvore de Natal

Finalmente o último caso de estudo foi uma contemporânea árvore de Natal que é representada por uma pirâmide constituída por três pernas (ocas), com uma torção de 60 graus no eixo vertical, e uma altura de 750 mm. Os desafios neste caso de estudo foram: i) conseguir ter a orientação da tocha para conseguir a inclinação e a torção das pernas; ii) construir a base oca e iii) conseguir a ligação entre as pernas no topo da árvore (Figura 6).

Neste caso as orientações foram adotadas com um valor máximo de 10 graus, variando nas direções ortogonais consoante a posição da camada, onde as orientações foram calculadas para cada camada.



**Figura 6**  
a) Árvore de Natal, b) zona de ligação e c) vista de cima.

## 5. Conclusão

Este artigo resumiu várias tecnologias disponíveis com o potencial para aplicação na indústria de construção. No entanto, o fabrico aditivo foi identificado como uma aplicação emergente para a construção, impulsionada pelo desejo arquitetónico por estruturas de forma livre.

Foram discutidos vários aspetos que têm influência na qualidade das propriedades do material e na otimização do ciclo de produção. Foi destacado que o processo de fabrico aditivo pode beneficiar significativamente da integração de softwares existentes com sensores avançados na produção. Ainda foi apresentado um sistema

inteligente capaz de incorporar deposição direta (WAAM), simulação e controle de produção para fornecer um produto final com a qualidade desejada. Finalmente, foram demonstrados casos de estudo realizados com objetivo de estudar e determinar os parâmetros que são importantes para o fabrico e aspeto final da peça.

Como estudos futuros identificam se a correlação entre os parâmetros de deposição e as trajetórias nas propriedades do material e a qualidade da impressão.

## Agradecimentos

Este trabalho foi financiado por:

- projeto AMCONSTRUCTION, com a referência Dr. Beate Schuler Innovation Fellowship 2019;
- FCT / MCTES pelos fundus (PIDDAC) na unidade de I&D Instituto para Sustentabilidade e Inovação na Engenharia Civil (ISISE), com referencia UIDB / 04029/2020

## Referências

- [1] Pires, J. N., "Robótica Industrial – Indústria 4.0", 1st edition, Lidel, 2018
- [2] Leach R. K., Bourell D., Carmignato S., Donmez A., Senin N., Dewulf W., Geometrical metrology for additive manufacturing. In: CIRP Annals – Manufacturing Technology, 68, 677-700.
- [3] Pires, J. N. and Azar A. (2018). Advances in robotics for additive/hybrid manufacturing: robot control, speech interface and path planning. In: Industrial robot: An International Journal, 45, 311-327.
- [4] Vaha P., Heikkila P., Kilpelainen P., Jarviluoma M., Gambao E., (2013). Extending automation of building construction – Survey on potential sensor technologies and robotic applications. In: Automation in Construction, 36, 168-178.
- [5] Oliveira J. P., Santos T. G., Miranda R. M., (2020). Revisiting fundamental welding concepts to improve additive manufacturing: From theory to practice, In: Progress in Materials Science, 107, 100590.
- [6] Ding, D., Pan, Z., Cuiuri, D. and Li, H., 2015. Wirefeed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 81 (1-4), pp. 465-481.
- [7] Ding, J., Colegrove, P., Mehnen, J., Ganguly, S., Almeida, P.S., Wang, F. and Williams, S., 2011. Thermo-mechanical analysis of wire and arc additive layer manufacturing process on large multilayer parts. Computational Materials Science, 50(12), pp.3315-3322.

- [8] Michaleris, P., 2014. Modeling metal deposition in heat transfer analyses of additive manufacturing processes. *Finite Elements in Analysis and Design*, 86, pp. 51-60.
- [9] Zhang Y., Bernard A., Harik R., Karunakaran K.P. (2017). Build orientation optimization for multipart production in additive manufacturing. In: *Journal of Intelligent Manufacturing*, 28, 1393-1407.
- [10] Buchanan C., Matilainen V. P., Salminen A., Garnder, L. (2017). Structural performance of additive manufactured metallic material and cross-sections. In: *Journal of Constructional Steel Research*, 136, pp. 35-48
- [11] AM-Motion (2018) A Strategic Approach to Increasing Europe's Value Proposition for Additive Manufacturing Technologies and Capabilities – First Draft AM Roadmap [www.rm-platform.com/images/D5.3\\_rev\\_July2018-rev9.pdf](http://www.rm-platform.com/images/D5.3_rev_July2018-rev9.pdf).
- [12] Sabourin E, Houser SA, Bohn JH (1996) Adaptive Slicing Using Stepwise Uniform Refinement. In: *Rapid Prototyping Journal* 2:20–26.
- [13] Greer C., Nycz A., Noakes M., Richardson B., Post B., Kurfess T., (2019). Introduction to the design rules for Metal Big Area Additive Manufacturing. In: *Additive manufacturing*, 27, 159-166.
- [14] Rodrigues T. A., Duarte V., Miranda R. M., Santos T. G., Oliveira J. P. (2019). Current status and perspectives on wire and arc additive manufacturing (WAAM). In: *Materials*, 12, 1121.
- [15] Gisario A., Kazarian M., Martina F., Mehrpouya M. (2019). Metal additive manufacturing in the commercial aviation industry: A review. In: *Journal of Manufacturing Systems*, 53, 124-149.
- [16] Parandoush P., Hossain A., (2014). A review of modelling and simulation of laser beam machining. In: *International Journal of Machine Tools & Manufacturing*, 85, 135-145.
- [17] Pires, J. N., Azar, A. S., Nogueira, F., Zhu, C. Y., Branco, R. and Tankova, T. (2021), "The role of robotics in additive manufacturing: review of the AM processes and introduction of an intelligent system", *Industrial Robot*.