



UNIVERSIDADE DE
COIMBRA

Elias Oliveira Romualdo da Silva

FABRICO ADITIVO PARA A CONSTRUÇÃO METÁLICA:
PROJETO, REALIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, na área de Especialização em Mecânica Estrutural, orientada pela Professora Doutora Trayana Stoykova Tankova e pelo Professor Doutor Joaquim Norberto Cardoso Pires da Silva e apresentada ao Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

Julho de 2021



FCTUC DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

Elias Oliveira Romualdo da Silva

Fabrico Aditivo para a Construção Metálica: Projeto, Realização e Caracterização

Additive Manufacturing for Steel Construction: Design, Realization and Characterization

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, na área de Especialização em Mecânica Estrutural,
orientada pela Professora Doutora Trayana Stoykova Tankova e pelo Professor Doutor Joaquim Norberto Cardoso
Pires da Silva.

Esta Dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor.
O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC, declina qualquer
responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões
que possam surgir.

Coimbra, 26 de julho de 2021

In memoriam de Antônio Romualdo,
meu querido pai.

“Sonho que se sonha só. É só um sonho.
(...) Mas sonho que se sonha junto é
realidade.”

– Raul Seixas

AGRADECIMENTOS

Uma longa caminhada se finda, e essa conquista não é só minha, muitas mãos fizeram parte dela. Gostaria de primeiro agradecer a Deus e à minha família, por todo carinho que têm por mim, mesmo estando distante. Em especial à minha querida mãe, Mariléia, por ter sido uma mulher guerreira e ter me criado com muita garra e dedicação. Dedico a ela todas as minhas conquistas. À Dona Lúcia, à Dâmares e ao Rafael, os meus mais sinceros votos de muito obrigado. Vocês acreditaram no meu sonho e me ajudaram. Terei uma infinita gratidão pela vossa bondade e cuidado para comigo ao longo de cinco longos anos.

Aos meus queridos amigos de caminhada, que atravessaram um oceano, e que Coimbra nos apresentou. Victor, Gabi e Felipe muito obrigado, vocês fizeram a caminhada ser menos dolorosa e o dia a dia mais feliz. Muito obrigado à Viviane Maciel e à Dona Irene, pelos conselhos, abraços e cafés. A todas as pessoas da CBC que se empenharam e lutaram junto comigo, em especial à Viviane Dobginski.

O meu mais profundo agradecimento aos professores do DEC, por terem me acolhido, ajudado em vários momentos. Muitos professores estiverem ao meu lado, sempre oferecendo suporte. Em especial ao Professor Doutor Rui Simões, que desde o primeiro na faculdade esteve sempre pronto a ouvir e a estender a mão, os meus mais profundos votos de gratidão, essa conquista não é minha, é nossa.

Aos meus colegas do Perfil em Mecânica Estrutural, com os quais vivi um ano difícil e inesquecível, e que me ajudaram imenso a vencer esta última etapa do mestrado, juntos somos mais fortes malta. David, Marco, Miguel e Patrícia, foi um grande prazer fazer esta caminhada com vocês.

À Professora Doutora Trayana Trankova, por ter me orientado neste trabalho, e sempre solícita em ajudar e esclarecer as minhas dúvidas, e pela paciência e empenho empregado na conclusão da dissertação. Ao Professor Doutor Norberto Pires, por ter tornado possível este trabalho. A presente dissertação foi financiada pelo projeto AMConstruction, inserido no âmbito do Centre for Mechanical Engineering, Materials and Processes – CEMMPRE e Institute for Sustainability and Innovation in Structural Engineering – ISISE localizados na Universidade de Coimbra.



RESUMO

A revolução digital está a ganhar espaço em várias indústrias. Mesmo na era da *internet* e dos robôs, dispositivos sofisticados e simulação em tempo real, o sector da construção continua altamente dependente do trabalho manual. O qual é a principal fonte de atrasos, falta de qualidade e acidentes de trabalho. O desenvolvimento rápido em áreas tecnológicas tais como robôs autónomos, computadores de alta *performance*, sensores, inteligência artificial, gestão de dados e *internet* das coisas, constitui um enorme potencial para muitas aplicações na indústria da construção. O fabrico aditivo é uma solução interessante, especialmente quando combinada com um sistema subtrativo, pois pode ser aplicada a geometrias complexas e fornece grande flexibilidade na localização e produção. No entanto, as tecnologias existentes, aplicáveis à escala do problema, conduzem a um elevado nível de imperfeições (tensões residuais e distorções) no produto final; as propriedades do material não são suficientemente bem caracterizadas e o comportamento estrutural ou as peças impressas em 3D não estão ainda bem estudadas. Portanto, esta dissertação de mestrado tem como objetivo explorar a aplicação do fabrico aditivo para a produção de elementos metálicos produzidos por fabrico aditivo para a utilização na indústria da construção.

Para tanto, realizou-se uma análise numérica e experimental de uma componente produzida através do fabrico aditivo, percorrendo as fases de dimensionamento, fabrico e validação estrutural da peça. O processo de soldadura utilizado é o *cold metal transfer* (CMT), que introduz menos calor ao processo de fabrico ao se comparar com os processos tradicionais, reduzindo assim a introdução de tensões residuais e distorções.

Palavras-chave: fabrico aditivo; impressão 3D; construção metálica; otimização topológica.

ABSTRACT

The digital revolution is gaining ground in several industries. Even in the age of the internet and robots, sophisticated devices and real-time simulation, the construction industry remains highly dependent on manual work. Which is the main source of delays, lack of quality and work accidents. The rapid development in technological areas such as autonomous robots, high-performance computers, sensors, artificial intelligence, data management and the internet of things, constitutes a huge potential for many applications in the construction industry. Additive manufacturing is an interesting solution, especially when combined with a subtractive system, as it can be applied to complex geometries and offers great flexibility in location and production. However, as they exist, applicable to the scale of the problem, they lead to a high level of imperfections (residual stresses and distortions) in the final product; as material properties are not sufficiently well characterized and the structural behavior or as continuous parts in 3D are not yet well studied. Therefore, this master's thesis aims to explore the application of additive manufacturing for the production of metallic elements produced by additive manufacturing for use in the construction industry.

For that, a numerical and experimental analysis of an integrated component was carried out through the additive manufacturing, going through the dimensioning, manufacturing and structural validation phases of the part. The welding process used is cold metal transfer (CMT), which introduces less heat to the manufacturing process compared to traditional processes, thus introducing residual stresses and distortions.

Keywords: additive manufacturing; 3D printing; steel construction; topological optimization.

ÍNDICE

Agradecimentos	i
Resumo	ii
Abstract.....	iii
Índice	iv
Índice de Figuras	vi
Índice de Tabelas	viii
Abreviaturas.....	ix
Simbologia.....	x
1 Introdução.....	1
1.1 Enquadramento	1
1.2 Objetivo da Dissertação	2
1.3 Estrutura da Dissertação	3
2 Revolução Tecnológica na Indústria da Construção Civil.....	4
2.1 Introdução	4
2.2 Fabrico Aditivo (FA)	5
2.2.1 Categorias de Impressão	6
2.2.2 Fabrico Aditivo com Arco	8
2.2.3 Problemas Associados ao Fabrico Aditivo	11
2.3 Mercado da Construção	12
2.3.1 Empresas de Impressão 3D.....	12
2.3.2 Problemas Sociais.....	14
2.3.3 Fabrico Aditivo Aplicado ao Mercado da Construção Metálica	15
3 Aspetos Gerais do Fabrico Aditivo	17
3.1 Introdução	17
3.2 Validação Estrutural	18
3.2.1 Otimização Topológica (OT)	18
3.3 <i>Slicing</i>	21

3.4	Ensaio Destrutivo.....	23
3.5	Robótica.....	24
4	Campanha Experimental.....	28
4.1	Projeto.....	28
4.2	Laboratório – Sistema de Fabrico Aditivo WAAM.....	29
4.3	Metodologia.....	30
5	Caso de Estudo.....	32
5.1	Apresentação do Estudo de Caso.....	32
5.1.1	Dimensionamento pelo Eurocódigo.....	32
5.2	Análise Numérica.....	34
5.2.1	Modelação.....	34
5.2.2	Otimização da Peça.....	36
5.2.3	Engenharia Reversa e <i>Slicing</i>	38
5.2.4	Análise Estrutural de Validação.....	40
5.3	Análise Experimental.....	42
5.3.1	Impressão.....	42
5.3.2	Ensaio Destrutivo.....	44
5.4	Resultados e Discussão.....	44
6	Conclusões e Trabalhos Futuros.....	48
6.1	Conclusões.....	48
6.2	Trabalhos Futuros.....	49
	Referências Bibliográficas.....	51
	Apêndice A – Dimensionamento Eurocódigo.....	A-1
	Apêndice B – Otimização Topológica.....	B-1
	Apêndice C – Otimização Topológica para 6% com Restrição.....	C-1
	Apêndice D – Otimização Topológica para 7.5% com Restrição.....	D-1
	Apêndice E – Engenharia Reversa.....	E-1

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Custo de mundança do projeto ao longo do ciclo de produção.	5
Figura 2.2 – Categorias e sub-categoria para PBF e DED.	7
Figura 2.3 – Esquemas das categorias de impressão.	7
Figura 2.4 – Fases do filamento no processo CMT.	10
Figura 2.5 – Fases globais da soldadura por CMT.	11
Figura 2.6 – Projeto Marsha da AI SpaceFactory, em Marte.	12
Figura 2.7 – Projeto Olympus da IconBuild, na Lua.	12
Figura 2.8 – Receita gerada pelo FA aplicado ao aço.	15
Figura 2.9 – Ligação otimizada pela ARUP.	16
Figura 2.10 – Ligação otimizada pela MX3D e Takenaka.	16
Figura 2.11 – Ponte desenvolvida pela MX3D.	16
Figura 3.1 – Influência da malha de elementos finitos, na otimização topológica. Exemplo de uma ponte.	19
Figura 3.2 – Categorias de otimização.	19
Figura 3.3 – Otimização de uma viga simplesmente apoiada.	20
Figura 3.4 – Análise do acúmulo de tensão.	21
Figura 3.5 – Evolução do <i>slicing</i> , em diversas camadas no <i>software</i> Slic3r, a utilizar o <i>infill</i> com trajetórias concêntricas. Desde a camada inicial (a) até a última camada (e).	22
Figura 3.6 – Resultado da otimização de uma viga com restrição de <i>overhang</i>	23
Figura 3.7 – Fluxograma de informações do sistema de impressão multiplano. Desenvolvido por pesquisadores da Virgínia Tech, usando ABB IRB 1200-7 braço robótico com 6-DOF. .	25
Figura 3.8 – Estrutura conceitual de gerenciamento de dados colaborativo habilitado para utilizar DT na aplicação do FA em elementos metálicos.	27
Figura 4.1 – Conceito do Projeto AMConstruction.	28
Figura 4.2 – Estrutura laboratorial para a categoria DED-WAAM.	30
Figura 5.1 – Viga treliçada analisada no estudo de caso, com a indicação das ações e dos esforços.	32
Figura 5.2 – Solução estrutural obtida no dimensionamento.	34
Figura 5.3 – Peça sólida inicial, modelo Abaqus.	35
Figura 5.4 – Análise elástica da peça inicial. (Tensão de von Mises em N/mm^2)	36
Figura 5.5 – Peça otimizada a 3% do volume inicial.	37
Figura 5.6 – Convergência da peça otimizada a 3% do volume inicial.	37
Figura 5.7 – Engenharia reversa da PP0 - A.	38
Figura 5.8 – CHS impresso, peça com 21 cm.	43
Figura 5.9 – Peça ensaiada à compressão.	44
Figura 5.10 – Análise materialmente não linear.	45
Figura 5.11 – Análise materialmente não linear com imperfeição.	45

Figura 5.12 – Curva carga-deslocamento da peça impressa.....	46
Figura 5.13 – Ensaios à compressão, CHS 75 impressos por PBF e CHS 139.7 impresso por DED-WAAM.	47
Figura 6.1 – CHS impresso com 500 mm, por WAAM – CMT.	49
Figura 6.2 – Parede impressa com 480 x 300 x 6 mm, por WAAM – CMT.	49

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 – Maquinaria comum na impressão 3D de elementos metálicos, utilizando PBF...	8
Tabela 2.2 – Empresas de construção no mercado da impressão 3D.....	13
Tabela 3.1 – Fases do DfAM e suas respetivas definições.....	17
Tabela 3.2 – Ensaios de compressão em <i>stub columns</i> , para secção oca, utilizando FA.	24
Tabela 4.1 – Metodologia utilizada na campanha experimental.	31
Tabela 5.1 – Parâmetros da modelação da peça para uma análise elástica.	35
Tabela 5.2 – Parâmetros da otimização utilizados no Abaqus Tosca.....	36
Tabela 5.3 – Definição das peças realizadas e das análises efetuadas na engenharia reversa, com indicação da variação mássica entre as peças.....	39
Tabela 5.4 – Parâmetros do <i>slicing</i> para a produção das paredes da peça.	40
Tabela 5.5 – Análises e respetivos parâmetros utilizados na validação estrutural das peças obtidas na engenharia reversa.....	41
Tabela 5.6 – Comparação da peça impressa com o CHS 139.7 x 6 mm.	43
Tabela 5.7 – Comparação de ensaios experimentais, submetido a ensaios de compressão, para secções CHS impressas por DED e PBF.	47

ABREVIATURAS

BIM	modelagem da informação da construção (<i>building information modeling</i>)
CAD	desenho assistido por computador (<i>computer-aided design</i>)
CHS	<i>circular hollow section</i>
CMT	<i>cold metal transfer</i>
DED	<i>directed energy deposition</i>
DfAM	<i>design for additive manufacturing</i>
DfMA	<i>design for manufacturing and assembly</i>
DMLS	<i>direct metal laser sintering</i>
DOF	graus de liberdade (<i>degrees of freedom</i>)
DT	<i>digital twin</i>
EC	eurocódigo
FA	fabrico aditivo
GMAW	<i>gas metal arc welding</i>
GMNIA	<i>geometrically and materially non-linear elastic analysis with imperfections</i>
IA	inteligência artificial
IC	indústria da construção
IoT	<i>internet das coisas (internet of things)</i>
LBA	<i>linear bifurcation analysis</i>
LCA	<i>life cycle assessment</i>
LPBF	<i>laser powder bed fusion</i>
MAG	<i>metal active gas</i>
MEF	métodos dos elementos finitos
MIG	<i>metal inert gas</i>
ML	<i>machine learning</i>
MNA	<i>material non-linear analysis</i>
NASA	<i>national aeronautics and space administration</i>
OT	otimização topológica
PBF	<i>powder bed fusion</i>
PIB	produto interno bruto
RHS	<i>rectangular hollow section</i>
SHS	<i>square hollow section</i>
STL	<i>standard tecelation language</i>
UK	<i>United Kingdom</i>
USA	<i>United States of America</i>
WAAM	<i>wire arc additive manufacturing</i>

SIMBOLOGIA

Letras minúsculas latinas

f_y	tensão de cedência
$f(x)$	função objetivo para maximização ou minimização
\bar{g}_j	restrição de desigualdade j
$g_j(x)$	função de desigualdade
i	raio de giração
$x_i(x)$	variável binária

Letras maiúsculas latinas

A	área total da secção
E	módulo de elasticidade
$E_{aço}$	módulo de elasticidade do aço
L_E	comprimento de encurvadura
$N_{b,Rd}$	valor de cálculo do esforço axial resistente à encurvadura por flexão
$N_{c,Rd}$	valor de cálculo esforço axial resistente de compressão
N_{ed}	esforço axial atuante
$N_{t,Rd}$	esforço axial resistente de tração
$N_{u,EC3}$	esforço axial obtido do dimensionamento pelo eurocódigo 3
$N_{u,test}$	esforço axial obtido no ensaio de deslocamento constante

Letras minúsculas gregas

γ_{MO}	coeficiente parcial de segurança para a resistência de seções transversais de qualquer classe
$\bar{\lambda}$	coeficiente de esbelteza normalizada
λ_1	coeficiente de esbelteza de referência
α	razão entre a zona comprimida e a totalidade de um componente de uma secção; factor de imperfeição relativo a encurvadura por flexão
γ_{Mi}	coeficiente parcial de segurança relativo a uma propriedade de um material, que cobre também incertezas de modelação e desvios de dimensão
ε	coeficiente dependente da tensão f_y ; parâmetro
λ	coeficiente de esbelteza relativo a encurvadura por flexão
Φ	parâmetro

χ	factor de redução para a encurvadura por flexão
ν	coeficiente de poisson
$\sigma_{0.2}$	tensão limite de elasticidade
ϵ_u	extensão última

Letras maiúsculas gregas

Ω_s	espaço sólido
Ω_v	espaço vazio

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

As grandes florestas de aço, tornaram-se centros fulcrais das sociedades hodiernas. Ao citar o termo cidade, na era pós-moderna, vêm-nos de imediato à mente a figura de grandes e pomposas construções, os arranha-céus. Grandes estruturas como o Burj Khalifa em Dubai ou o Petronas Towers em Kuala Lumpur, são grandiosos monumentos anunciando de um novo mundo, de cidades modernas com proporções jamais vistas.

Devido a um conjunto de ações oriundas da revolução industrial, a construção civil daria passos nunca dados, estava por nascer uma nova era da produção e comercialização de produtos que mudaria o mundo. Em 1885, o engenheiro Gustave Eiffel elaborou uma apresentação à *Société des Ingénieurs Civils*, para mostrar um projeto que acabara de finalizar, e no final da apresentação, *ipsis litteris*:

“Não só a arte do engenheiro moderno, mas também o século da Indústria e Ciência em que estamos a viver, e para o qual o caminho foi preparado pelo grande movimento científico do século XVIII e pela Revolução de 1789, ao qual este monumento será construído como uma expressão da gratidão da França.” (Loyrette, 1986)

Gustave estava a referir-se à Torre Eiffel que chegaria a 324 metros de altura, bem mais alta do que qualquer outra construção existente até então. Essa façanha só ocorreu devido aos avanços tecnológicos obtidos com a revolução industrial. Sobretudo na indústria do aço, onde ocorreu o desenvolvimento e melhoramento de novos materiais usados nos processos construtivos. Apesar do aço ser produzido há milhares de anos, e ter o seu uso enraizado na construção, a revolução industrial permitiu um grande avanço tecnocientífico na matriz do aço.

Se a indústria da construção foi impulsionada no início do século XIX devido à revolução industrial ocorrida, não há dúvidas que estamos perante o início de um novo momento revolucionário: a revolução das máquinas e do uso de tecnologia de alto nível nos processos construtivos, a chamada Quarta Revolução Industrial¹. A necessidade de reformular a indústria da construção com adesão a fontes computacionais dinâmicas, é notória. Com o advento da

¹ Primeira Revolução Industrial – século XVIII, Segunda Revolução Industrial – 1870, Terceira Revolução Industrial – 1970, e Quarta Revolução Industrial – no presente, adjunto da Revolução Digital (Alaloul et al., 2020).

pandemia do COVID-19, esta reformulação ganhou mais espaço, evidenciando os atrasos tecnológicos que a indústria da construção possui.

Para reforçar a necessidade da inovação, os projetos precisam ser mais sustentáveis, com o objetivo de diminuir o impacto ecológico gerado. Pretende-se com isso minimizar a produção de resíduos, impactos sociais, custos de construção e maximizar o desempenho funcional, conforto e sustentabilidade da construção. Nasce a mentalidade de projetar construções funcionais e não de construir por construir (World Economic Forum, 2016, 2020a).

A mentalidade, de realização de projetos, começou a mudar de *design to production* para *design to function* (Buchanan & Gardner, 2019). Devido a isso muitas *startups* estão a surgir, com a objetivo de revolucionar a indústria, a exemplo da Kattera, que possui uma metodologia de projeto *all in one*, do projeto inicial até a construção. Onde todo o projeto é feito de forma conjunta e integrada, recorrendo, inclusive a soluções modulares (Kattera@, 2021).

Desse modo, os processos construtivos atuais precisam ser revistos, melhorados e integrar mais tecnologias em um sector pouco conhecido por ser inovador. Para além de oferecer um ambiente de trabalho mais funcional, é necessário gerar mais bem estar social para os trabalhadores da indústria da construção (Hossain et al., 2020).

1.2 Objetivo da Dissertação

O escopo deste trabalho é analisar em detalhe a implementação do fabrico aditivo (FA) na indústria da construção (IC), em específico na construção metálica. Realizando uma vasta revisão bibliográfica do estado da arte, sobre a utilização do FA no mercado da construção civil, em específico na utilização em elementos metálicos. Tal como investigar empresas e projetos já realizados, analisando assim a aplicação no mercado atual e os problemas que o FA possui, com o objetivo de elucidar o caminho necessário para resolvê-los.

Para exemplificar será sucedida a otimização de uma peça com secção sujeita a compressão pura, realizada através do FA, efetuando de seguida um ensaio destrutivo para verificação do desempenho estrutural da peça feita em FA. O processo de soldadura utilizado é o *cold metal transfer* (CMT), que realiza a deposição de matéria a temperaturas mais baixas que os métodos convencionais de soldadura, reduzindo assim a introdução de tensões residuais e distorções no processo de fabrico. O CMT é constituído por um sistema não contínuo, com múltiplas deposições de matéria por segundo.

1.3 Estrutura da Dissertação

A dissertação encontra-se organizada em 6 capítulos, e seus respectivos sub-capítulos. Inicialmente, no primeiro capítulo, apresenta-se um breve enquadramento histórico da utilização do aço na IC, o objetivo e a própria estrutura da dissertação.

No capítulo 2, realiza-se uma introdução do FA na construção civil, focando a sua aplicação ao aço, incluindo exemplos de projetos já realizados e de empresas que possuem soluções construtivas no âmbito da impressão 3D. Para além de destacar os principais problemas da utilização do FA.

O terceiro capítulo, tratará a exploração do estado da arte acerca do projeto em FA. Neste encontra-se as fases necessárias para realizar o projeto utilizando o FA, assim como os seus respetivos princípios. Para além da introdução dos principais conceitos de otimização e da utilização de sistemas robotizados no processo do FA.

A estrutura laboratorial e o objetivo do projeto AMConstruction são apresentados no quarto capítulo, como a metodologia da campanha experimental realizada.

O capítulo 5 apresenta um estudo de caso, onde se analisa a viabilidade da aplicação da técnica de impressão a uma solução estrutural, recorrendo a uma análise numérica e experimental. A análise numérica é realizada no Abaqus em duas etapas (validação estrutural e otimização topológica), outra etapa é realizada no Inventor (engenharia reversa) e finda-se por realizar a impressão de uma peça.

Por fim, no capítulo 6, apresentam-se as conclusões obtidas e a indicação de tópicos que precisam de ser explorados em pesquisa e desenvolvimento futuros, para que seja possível uma aplicação direta do fabrico aditivo na construção civil.

2 REVOLUÇÃO TECNOLÓGICA NA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO CIVIL

2.1 Introdução

Notoriamente, a IC é uma das maiores indústrias em termos de produção mundial. Esta é responsável por mais de 30% da emissão de gases de efeito estufa devido a construção de edifícios, apesar de apenas 6% do PIB dos países, em média, serem destinados à construção. A IC é a que menos investe em tecnologia, uma das que possui maior número de mortes dos seus trabalhadores, para além de ser uma grande fonte poluidora (World Economic Forum, 2016, 2019). O sector da construção é marcado por atrasos frequentes em projetos e grandes escândalos de corrupção. Um cenário lamentável para a indústria, resultado da falta de renovação tecnológica e da posição conservadora que assume (Kim et al., 2015). Felizmente, uma mudança de mentalidade começa no sector, e a revolução tecnológica está a ganhar o seu devido espaço, com isso o processo construtivo se torna cada vez mais sustentável². É inevitável que a onda de renovações que já ocorre em outras indústrias, de forma mais relevante, ocorra também na IC. Tornando-se uma mudança necessária para responder às novas exigências de redução de emissão de carbono, pretendida pelo Acordo de Paris, como o objetivo dos USA de reduzir em 50% as emissões de gases de efeito estufa até 2030 (The Guardian@, 2021a). Ou do UK, que possui uma meta específica para a IC apontando para uma redução de 50% da emissão dos gases de efeitos estufa até 2025 (World Economic Forum, 2016).

Para poder assistir à população atual que ainda não possui moradia, e à população futura³, para além de obras relativas às infraestruturas de apoio ao desenvolvimento socioeconómico do tecido urbano, a IC precisa renovar e investir no seu desenvolvimento tecnológico. Em termos económicos, estima-se que ao aumentar a produtividade em 1%, devido a adoção de soluções que possuam inovações tecnológicas, ter-se-ia uma economia de \$100 bilhões por ano (World Economic Forum, 2016). Para os próximos 25 anos, espera-se que a necessidade pela construção de infraestruturas chegue a \$100 trilhões (World Economic Forum, 2017). Apenas a utilização de *building information modeling* (BIM) não é suficiente para atender às necessidades atuais. É indispensável adicionar meios robotizados e automatizados para tornar o processo construtivo mais eficiente, para além da introdução de tecnologias digitais já estabelecidas em outras indústrias (Kim et al., 2015). A utilização de tecnologias digitais como *machine learning* (ML), *internet das coisas* (IoT), inteligência artificial (IA), armazenamento e gerenciamento de dados e tecnologias de manufatura como fabrico aditivo (FA) são

²World Economic Forum (2020a) define as seis qualidades de uma infraestrutura sustentável, *six qualities of sustainable infrastructure* (GFC-6).

³A taxa de crescimento populacional mundial atual encontra-se no patamar de 200 mil pessoas por dia, para áreas urbanas em média (World Economic Forum, 2016).

classificadas entre as dez tecnologias mais inovadoras para os próximos anos com base em World Economic Forum (2020b).

O FA tem seu uso mais avançado nos sectores da mecânica aplicada às aeronaves e automóveis (Richardson, 2017). O factor da escala do produto com que trabalham e a facilidade de terem um mesmo produto replicado inúmeras vezes, tornou o FA um processo economicamente viável, pois a esse processo de fabrico adicionaram-se técnicas de otimização as quais possibilitaram que peças com inúmeras componentes pudessem ser realizadas em uma única peça. Assim como, um processo inverso onde se determina as características pretendidas de um material e cria-se um material “ideal” (Yadollahi & Shamsaei, 2017). Na IC, a escala de produção a ser realizada as impressões, sugere que alguns problemas que conseguem ser contornados nas indústrias de peças pequenas são mais difíceis de serem resolvidos a uma escala macro. Afirmado assim a necessidade de mais estudos nesta área (Tankova & Simões da Silva, 2020). A pandemia do COVID-19 ajudou a impulsionar a investigação e o desenvolvimento de algumas tecnologias, como a sua implementação no mercado, a exemplo do FA (World Economic Forum, 2020c). As novas tecnologias possuem a função de melhorar e prever possíveis falhas e/ou ausências ainda em fase de projeto, o que acarreta num custo económico do projeto final inferior, comparando com mudanças feitas em fases avançadas do empreendimento, como ilustrado na Figura 2.1.

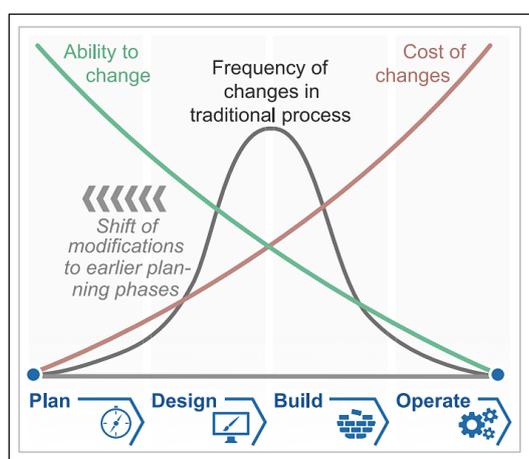


Figura 2.1 – Custo de mudança do projeto ao longo do ciclo de produção.

Fonte: The Boston Consulting Group; World Economic Forum (2016) – página 26.

2.2 Fabrico Aditivo (FA)⁴

O FA, mais popularmente conhecido como impressão 3D, é um processo de fabrico baseado na adição de matéria em camadas. O formato dos ficheiros utilizados nas impressoras atuais é feita

⁴ As terminologias acerca do FA são definidas pela ISO/ASTM 52921 (2013).

a partir de um ficheiro *computer-aided design* (CAD), exportado em um ficheiro STL⁵, sendo estes os formatos universais na linha de produção do FA (Thompson et al., 2016).

O FA pode ser aplicado a um conjunto vasto de materiais, desde polímeros, materiais compósitos, betão⁶ e aço. Apesar de ser um procedimento praticado há algumas décadas, foi a partir da década 1980 que o FA começou a tornar-se mais real no dia a dia, resultado de um conjunto de investimentos feitos entre as décadas de 1960 e 1970 (Thompson et al., 2016). Entretanto, há 40 anos, ainda apresentava maquinaria e materiais com alto custo, limitados e pouco desenvolvidos. Nos dias atuais o FA é muito recorrente, sobretudo com a utilização do *design for manufacturing and assembly* (DfMA)⁷, tornando os processos de fabrico mais produtivos e com menor geração de resíduos e desperdícios. A prática de usar impressão 3D ficou popular no momento que foram desenvolvidas máquinas de códigos abertos, em 2004. Possibilitando assim que mais pessoas pudessem aceder à tecnologia, o que naturalmente reduziu o preço das máquinas de impressão, no que engloba a impressão de polímeros sobretudo, iniciando uma onda entusiasta da utilização do FA (Abreu, 2015).

2.2.1 Categorias de Impressão

Segundo Quarshie et al. (2012), existem várias categorias de impressão, e essas dependem do material utilizado. Os parâmetros e as propriedades dos materiais podem variar de uma categoria para a outra. Portanto, é preciso perceber como ocorre a impressão em cada uma delas, e qual é a mais adequada para cada material (Karayel & Bozkurt, 2020).

As categorias de impressão⁸ mais utilizadas em impressão de elementos metálicos para a IC são a *directed energy deposition* (DED) e a *powder bed fusion* (PBF). Na Figura 2.2 ilustra-se um esquema com estas duas categorias, bem como as suas respetivas subcategorias (Buchanan & Gardner, 2019; Zhang et al., 2021).

⁵ STL é uma sigla que recebe diferentes nomenclaturas, como *standard triangle language*, *stereolithography language*, *stereolithography tessellation language* ou *standard teclation language*.

⁶ O betão é uma das misturas mais usadas na indústria global, não é um material reciclável, apenas uma pequena parte do resíduo de construção e demolição (RCD) tem uma reaplicação no mercado. Sendo o cimento usado na sua composição responsável pela emissão de 5 a 7% de toda a emissão de CO₂. Para além do uso em excesso de areia e do consumo de quase 10% da água utilizada nas indústrias. Assim sendo, o betão é notoriamente pouco sustentável, como denotado em Adaloudis & Roca (2021).

⁷ DfMA, resume-se a um processo de otimização de uma componente, ou de um conjunto de componentes de uma peça, de forma a maximizar o desempenho estrutural da peça e reduzir o custo, tempo de produção e resíduos gerados (Thompson et al., 2016).

⁸ As setes categorias de FA definidas pela ISO/ASTM 52900 (2015) são: PBF, DED, *material jetting*, *binder jetting*, *sheet lamination*, *vat photopolymerization* e *material extrusion*.

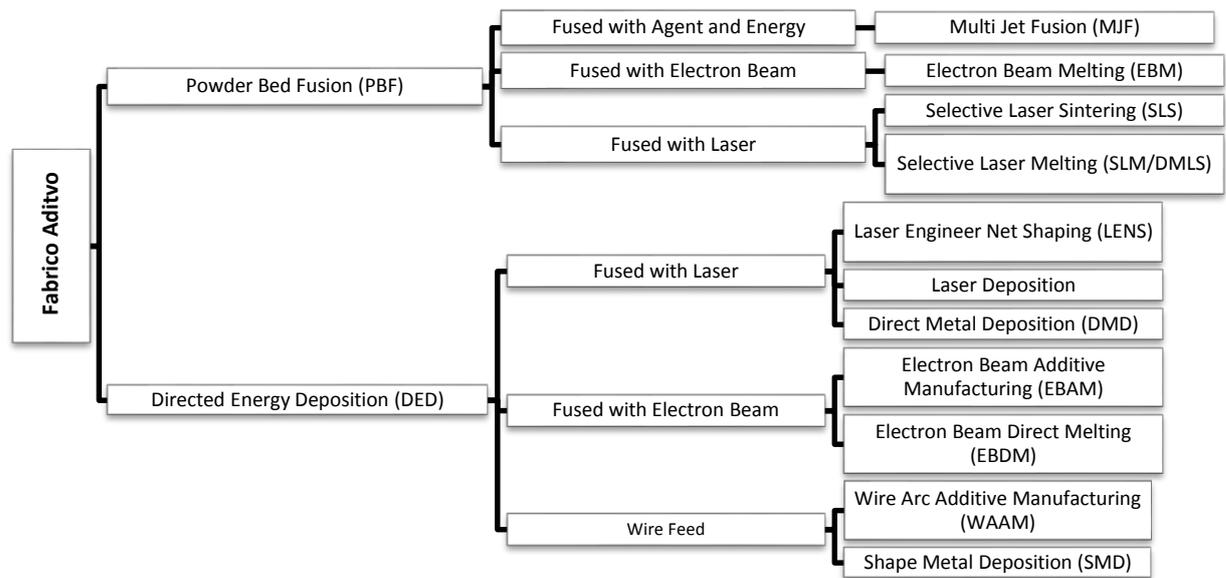


Figura 2.2 – Categorias e sub-categoria para PBF e DED.

Para a categoria PBF (Figura 2.3 (a)) uma fonte de calor⁹ (*laser* ou *electron beams*) é usada para realizar a fusão do material em pó, camada a camada. A cada nova camada há adição de mais material a camada anterior através da fusão do pó, esse processo repete-se até obter a peça sólida desejada. Uma parte do pó restante é reutilizada, outra parte por não possui as propriedades adequadas, não. À medida que o processo avança a *build platform* movimenta-se de maneira descendente e o processo de fusão ocorre sempre à mesma altura, em regra, no mesmo plano. Quando a camada está finalizada, a *build platform* move-se para baixo e o *powder roller* distribui uma nova camada de pó (Karayel & Bozkurt, 2020; Nogueira, 2021; Thompson et al., 2016).

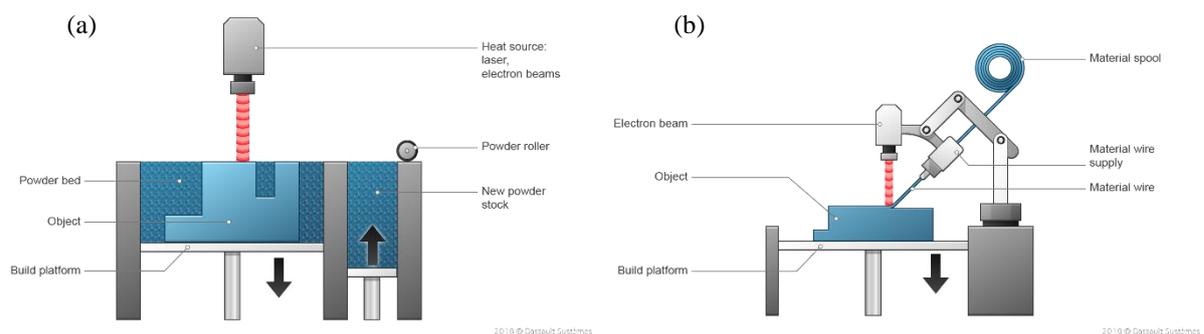


Figura 2.3 – Esquemas das categorias de impressão.
 (a) Powder Bed Fusion – PBF e (b) Directed Energy Deposition – DED.

Fonte: Dassault Systèmes@ (2018).

⁹ Para o FA em elementos metálicos há a divisão em três grupos de processos diferentes, de acordo com a fonte de calor associada: *laser*, *electron beam* ou *electric arc* (Prado-Cerqueira et al., 2017).

A categoria DED ilustrada na Figura 2.3 (b), segundo alguns autores é diferente da PBF, pois consiste em realizar a deposição direta de matéria (Nogueira, 2021; Thompson et al., 2016). A deposição direta ocorre da seguinte forma: aquecimento do material e respetiva fusão ao substrato, o processo é repetido a cada camada. Nos dias de hoje, DED é a principal categoria para a impressão de peças em metal (Vaneker et al., 2020). Recentemente surgiu um novo processo que possui aplicação em elementos metálicos, o *electrochemical additive manufacturing* (ECAM). Este encontra-se num estado embrionário e ainda não tem as suas potencialidades totalmente exploradas na aplicação à IC (Buchanan & Gardner, 2019).

A categoria PBF tem como limitação principal o seu reduzido envelope de impressão¹⁰, não possuindo assim dimensão necessária para ser aplicada na IC, uma vez que, as peças estruturais mais comuns variam entre 3 e 5 metros de extensão (Laghi et al., 2020). A empresa Adira possui a máquina com o maior envelope de impressão atualmente (Tabela 2.1). Por outro lado, a categoria PBF possui a vantagem de ser um processo de fabrico muito preciso. Para peças médias e de geometria simples, usar DED é 10 vezes mais rápido e 5 vezes mais barato que usar PBF (Vartanian et al., 2016). Por isto a categoria DED é a que possui maior aplicação em elementos metálicos na indústria da construção, sobretudo com a subcategoria de impressão *wire arc additive manufacturing* (WAAM).

Tabela 2.1 – Maquinaria comum na impressão 3D de elementos metálicos, utilizando PBF.

Método de Manufatura	Máquina	Envelope de Impressão	Capacidade Máxima de Fabrico	Referência
DMLS	EOS M 290	250 mm × 250 mm × 325 mm	-	(EOS, 2019)
DMLS	EOS M 280	250 mm × 250 mm × 325 mm	13.3 cm ³ /h	(Yan et al., 2019)
LPBF	Adira AC ADDCREATOR	1020 mm × 1020 mm × 500 mm	180 cm ³ /h	(Adira, 2020)

A impressão por WAAM pode recorrer a um conjunto de equipamentos auxiliares, como braços robóticos e sistemas de soldadura específicos. O processo de impressão pode levar de minutos a dias para ser concretizado (Vaneker et al., 2020).

2.2.2 Fabrico Aditivo com Arco

Como destacado anteriormente a categoria DED é a mais promissora na impressão de elementos metálicos aplicados à IC. A utilização de WAAM associada à tecnologia *cold metal transfer* (CMT) possui resultados animadores na aplicação do FA, pois o rácio de deposição de material é superior aos outros processos de fabrico, pois possui uma precisão de 1 mm. Uma das

¹⁰ Um envelope de impressão refere-se ao volume útil disponível, pela máquina, para a realização do processo de impressão 3D, ou FA.

vantagens da utilização do CMT para Prado-Cerqueira et al. (2017), quando comparado com os processos convencionais, é a redução de calor gerado acumulado. Reduz-se assim a introdução de tensões residuais e distorções, tendo como velocidade ideal para o valor ótimo do rácio de deposição de material 400 mm/min. Velocidades mais altas são responsáveis por provocar imperfeições na deposição do material e promover irregularidades na superfície da peça, enquanto velocidades mais baixas aumentam o tempo de elaboração da peça. CMT foi desenvolvido pela empresa Fronius em 2004, inspirada no processo *gas metal arc welding* (GMAW), sendo a intensidade da corrente e a voltagem parâmetros fundamentais para realização do processo de soldadura, bem como os ciclos de repetição que ocorrem (Prado-Cerqueira et al., 2017; Selvi et al., 2018).

Segundo a Fronius, as principais vantagens da utilização do CMT são: a aplicação de calor mínimo, a reduzida formação de respingos (devido a corrente cair para zero), a redução de emissões e a alta estabilidade do processo. Na Figura 2.4 encontra-se uma ilustração do processo CMT, onde se representa a tocha e o substrato que fazem parte do circuito elétrico, sendo esse último ligado a um cabo de soldadura. De acordo com Prado-Cerqueira et al., (2017) a tecnologia CMT assemelha-se à soldadura *metal inert gas* (MIG). A soldadura MIG inicia-se quando a tocha começa a formar o arco¹¹, onde o filamento é direcionado até o substrato (*vide* Figura 2.4 (a)). Há um sistema de gases de proteção¹² que fluem pela tocha e com o calor associado ocorre a formação do arco, dando-se o derretimento do filamento, desta forma, o filamento funde-se à poça de fusão (Figura 2.4 (b)).

O processo de soldadura consiste em introduzir calor e arrefecer, repetindo de forma cíclica, isso provoca distorções na peça em construção, da mesma forma que pode provocar no substrato utilizado. A valência introduzida pelo CMT, é o processo ser não contínuo. O filamento retrai-se no momento que adere à poça de fusão e com esse movimento ocorre o seu desprendimento (Figura 2.4 (c)). Ao quebrar o arco, o calor introduzido no processo é interrompido, o que conduz que o arco e o gradiente térmico gerado sejam menores. Como ilustrado em Figura 2.4 (d), a soldadura inicia um novo ciclo sobre uma parte do material depositado na fase anterior. À vista disso o CMT realiza um processo não contínuo, o que reduz a quantidade de energia aplicada, em comparação com o MIG.

¹¹ O arco, também conhecido como arco elétrico, arco voltaico ou curto-circuito. O arco ocorre quando há a transição de eletrões, entre diferentes elétrodos, produzindo dessa forma corrente.

¹² Deve-se usar uma mistura de gases de proteção, respeitando a norma ISO 14175. A composição da mistura varia de caso para caso (González et al., 2017).

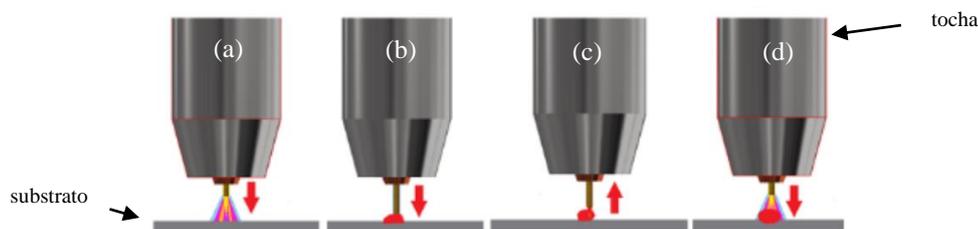


Figura 2.4 – Fases do filamento no processo CMT¹³.

- (a) Ignição do arco, (b) Imersão na poça de fusão, (c) Movimento retrativo em curto-circuito e
d) Inversão do movimento.

Adaptado de: Prado-Cerqueira et al. (2017) – página 3.

A aplicação de calor é minimizada, pois o curto-circuito ocorre quando a tocha entra em contato com a poça de fusão, que encontra-se no substrato, e de seguida há um retrocesso do filamento (Selvi et al., 2018). O filamento é retraído em intervalos de tempo muito curtos, devido a essa movimentação a deposição do material é mais eficiente, há menor deposição de respingos e o processo de deposição do material é mais controlado. A deposição pode chegar a 70 gotas de filamento por segundo Prado-Cerqueira et al. (2017).

Já foram elaborados alguns estudos avançados acerca da tecnologia do CMT, mas ainda carecem de maior investigação a respeito das suas potencialidades como salientam Cadiou et al. (2020) e Zhou et al. (2017). O CMT permite novas aplicações como realizar a soldadura aço-alumínio, que outrora era um processo complicado agora torna-se exequível. Ao analisar as correntes elétricas e as voltagens, é possível distinguir três fases da soldadura por CMT, como ilustrado na Figura 2.5 (Selvi et al., 2018) e indicadas abaixo.

- i. Alto pico da corrente: com arco constante, responsável por iniciar a ignição do arco de soldadura.
- ii. O *background* da fase da corrente: corrente mais baixa, até ocorrer o curto-circuito.
- iii. Fase do curto-circuito: a tensão de voltagem do arco vai a zero, promovendo um retrocesso do filamento.

¹³ Concluiu-se que ao utilizar CMT, é possível construir paredes com inclinação dos 90° ao 15°, com a tocha posicionada ortogonalmente ao plano de impressão, o que permite grande flexibilidade de impressão (Kazanas et al., 2012).

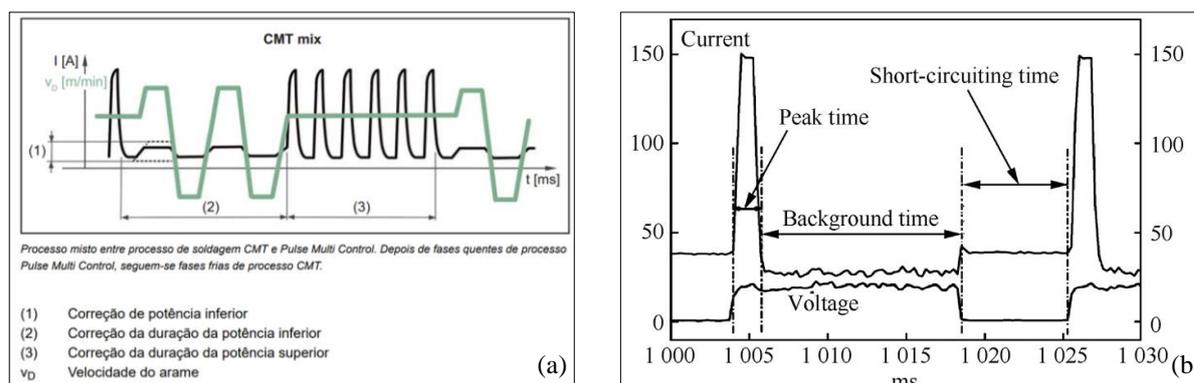


Figura 2.5 – Fases globais da soldadura por CMT.

(a) CMT mix da Fronius e (b) Formas da corrente e voltagem/tensão.

(a) – Fonte: Fronius (2021). / (b) – Fonte: Selvi et al. (2018) – página 3.

2.2.3 Problemas Associados ao Fabrico Aditivo

Um dos principais problemas associados à produção de peças por FA é a introdução de tensões residuais e distorções a cada camada feita. Na impressão 3D de metais, o aquecimento gerado no processo de soldadura promove deformações plásticas, devido ao ciclo de aquecer e arrefecer a peça inúmeras vezes. Como o processo de impressão 3D de elementos metálicos é um procedimento de soldadura camada a camada, a cada nova camada há a introdução de calor em uma parte da peça que estava a uma temperatura mais baixa, introduzindo eventos de dilatação frequentes, que originam as tensões residuais e as distorções nas peças.

Há pós-tratamentos específicos para revolver esses problemas. É possível realizar medições das imperfeições a *laser*, entretanto, ter o controlo da introdução de tensões residuais e distorções em fase anterior à produção, ainda não é bem caracterizado. Esses fenómenos podem agravar o comportamento à fadiga da peça, promovendo roturas frágeis, e ainda ajudam no processo de corrosão e instabilidade dimensional (Thompson et al., 2016).

Para além das imperfeições, devido ao processo em si, há a caracterização do material utilizado. Para o FA usando o CMT, é necessário utilizar um filamento do aço, feito a partir de uma liga metálica em diâmetros que podem chegar ao milímetro. Esses filamentos de aço não possuem características mecânicas bem definidas, variam de fornecedor para fornecedor e de material para material. A resistência mecânica da peça final é dependente da orientação da trajetória de pontos e dos parâmetros adotados na impressão. À vista disso, é importante realizar a caracterização mecânica sempre que houver troca de parâmetros de impressão e da trajetória de pontos assumida. Como a estratégia de impressão é diferente de peça para peça, quase sempre haverá esta necessidade (Tarus, 2020; Weber, 2020).

Outra dificuldade encontrada é a falta de mão de obra e/ou maquinaria especializada. A utilização do FA se torna ainda mais eficiente se for usada com meios robóticos associado a sistemas autónomos, como a integração de um sistema *digital twin* (DT)¹⁴. Pois assim será possível realizar simulações virtuais, não gerando gasto com desperdício, da mesma forma que é possível realizar a impressão automaticamente, apenas com a vigilância de um operador (Jafari et al., 2021).

2.3 Mercado da Construção

2.3.1 Empresas de Impressão 3D

Na última década os processos, as técnicas e a maquinaria utilizada no FA evoluíram e permitiram uma grande expansão na IC. É habitual encontrar soluções de FA a utilizar betão, aço e suas variantes, da mesma forma que novos materiais (Richardson, 2017). O desenvolvimento tecnológico também é impulsionado por empresas que trabalham em soluções construtivas com base em ideias de conceção estrutural inovadora e com forte aplicação de novas tecnologias. Como é possível observar nos projetos de construção de instituições privadas, como a AI SpaceFactory e a Icon, apresentados nas Figura 2.6 e Figura 2.7. Apesar de desenvolverem soluções utilizando robôs, matérias e técnicas para a aplicação do FA em construções de infraestruturas e/ou habitações na Terra, as empresas citadas possuem financiamento em projetos espaciais, a exemplo do Projeto Marsha em Marte e do Projeto Olympus na Lua. Esses projetos só são possíveis de serem realizados pois recorram a utilização do FA.



Figura 2.6 – Projeto Marsha da AI SpaceFactory, em Marte.

Fonte: AI SpaceFactory@ (2021).

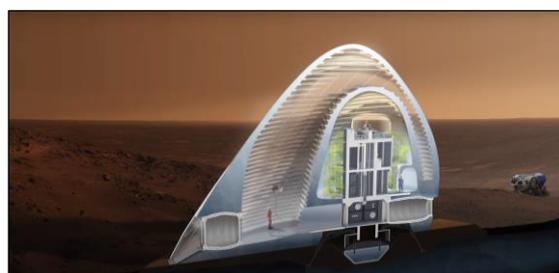


Figura 2.7 – Projeto Olympus da IconBuild, na Lua.

Fonte: ICON Technology@ (2021).

¹⁴ Um DT, é sistema de trabalho que compõe dois ambientes, um físico/real e outro virtual. Sendo possível realizar simulações virtuais em simultâneo com o processo real. Pode-se realizar uma simulação virtual acelerada, ou pode apenas realizar a simulação virtual com o objetivo de analisar se o processo real será realizado da forma pretendida (Malik & Brem, 2021).

Há empresas de construção com volume de negócios avançados, como a WinSun na construção em FA com betão e suas variantes, tal como empresas que estão a aplicar o aço¹⁵ em projetos construtivos, a exemplo da ARUP e da MX3D (Buchanan & Gardner, 2019). Na Tabela 2.2, reuniu-se uma lista das principais empresas que atuam no mercado da impressão 3D, focadas em construção de edifícios e/ou infraestruturas.

Tabela 2.2 – Empresas de construção no mercado da impressão 3D.
Adaptado de: Cai et al. (2019).

No.	Empresa	País	Tipo	Website	Referência
1	Ai Build	UK	impressão 3D	https://ai-build.com/	(Cai et al., 2019)
2	AI SpaceFactory	USA	impressão 3D	https://www.aispacefactory.com/	(Archdaily@, 2021)
3	Apis Cor	Rússia	impressão 3D	https://www.apis-cor.com/	(Cai et al., 2019)
4	CyBe Construction	Holanda	impressão 3D	https://cybe.eu/	(Cai et al., 2019)
5	ICON	USA	impressão 3D	https://www.iconbuild.com/	(All3DP@, 2021)
6	Mighty Buildings	USA	impressão 3D	https://mightybuildings.com/	(All3DP@, 2021)
7	MX3D	Holanda	impressão 3D metálica	https://mx3d.com/	(Cai et al., 2019)
8	WASP	Itália	impressão 3D	https://www.3dwasp.com/en/	(Delgado Camacho et al., 2018)
9	XtreeE	França	impressão 3D	https://xtreee.com/	(Delgado Camacho et al., 2018)
10	Yingchuang Building Technique Co. (Winsun 3D)	China	impressão 3D	http://www.winsun3d.com/en	(Cai et al., 2019)

É possível encontrar uma lista de outras empresas que trabalham no mercado de renovação tecnológica da indústria das construções, não apenas no mercado do FA, mas também novos materiais e meios robotizados em Cai et al. (2019). Igualmente, em Buchanan & Gardner (2019) e Paolini et al. (2019), alguns exemplos de projetos construídos utilizando FA são explicitados. Outras empresas que possuem contribuição relevante para o mercado do FA em aço é a ARUP e a Takenaka. A empresa Skanska, que apesar de não ser a impressão 3D o seu principal foco, desenvolveu trabalhos neste campo da renovação tecnológica da construção de impacto relevante (World Economic Forum, 2016).

Apesar de ser possível aplicar o FA em obras na IC, como demonstrado anteriormente, ainda há muitos desafios em tornar o FA recorrente no dia a dia da construção como: o alto custo global da tecnologia; a falta de capacidade técnica de programação e automação por parte dos engenheiros estruturais; os materiais com capacidades resistentes não adequadas; falta de regulamentação e padronização de processos; o difícil controlo da introdução de tensões

¹⁵ As empresas com aplicação de FA, no mercado do aço, e as suas variantes, é inferior as de betão, e suas variantes, na IC (Delgado Camacho et al., 2018).

residuais; as distorções não bem definidas; a validação de um método de desenvolvimento de projeto; a validação de máquinas e materiais e por fim a limitação construtiva atual (Buchanan & Gardner, 2019; Paolini et al., 2019; Richardson, 2017; Tankova & Simões da Silva, 2020; Yadollahi & Shamsaei, 2017).

2.3.2 Problemas Sociais

Foi realizado um estudo na Europa para perceber o impacto da adoção da impressão de betão na IC e qual foi o principal motivo da adoção desta tecnologia. O estudo concluiu que os principais motivos para implementação do FA em betão foram a busca por promover uma maior automação do processo construtivo e a necessidade de resolver o problema da falta de mão de obra qualificada. Apesar das novas demandas de sustentabilidade a questão ambiental não foi o princípio motivador da implementação desta tecnologia. A regulamentação europeia vigente ainda não possui benefícios suficientes para que a sustentabilidade ambiental seja o principal motivo da implementação da impressão 3D de forma geral (Adaloudis & Roca, 2021).

Fatores sociais e técnicos são os principais motivos apontados pelo atraso na IC da adoção das tecnologias da Revolução Digital, associadas à Quarta Revolução Industrial. Um dos pilares dessa revolução é a busca pela sustentabilidade social, económica e ambiental. Além de fornecer desenvolvimento económico e ambiental, é preciso usar as novas tecnologias para melhorar as questões sociais, tanto dos trabalhadores como dos afetados pelas construções, ou pela falta da mesma (Alaloul et al., 2020).

Países desenvolvidos possuem a mão de obra da IC, escassa e cada vez mais velha. A indústria da construção não é atrativa para os jovens devido ao seu atraso tecnológico e pelo desgaste físico que as funções geram. A força de trabalho é composta por mão de obra não qualificada, sobretudo por imigrantes. Frequentemente, tem-se no meio de comunicação social, relatos da exploração desse tipo de mão de obra, que em regra, se encontram em situação de vulnerabilidade social. Como exemplo, nos últimos 10 anos no Catar morreram mais de 6500 trabalhadores da construção dos estádios e das infraestruturas de assistência do Campeonato Mundial de Futebol 2022 (The Guardian@, 2021b). Destacando a construção como uma das principais indústrias em mortes dos seus trabalhadores. Por esses motivos apresentados, empregar meios robotizados e automatizados permitiria a esses países reduzirem o desgaste físico dos seus trabalhadores, melhorar a produtividade, aumentar a precisão construtiva e minimizar os atrasos e desperdícios (World Economic Forum, 2016).

Alguns empresários da área destacam que esta é uma situação insustentável a longo prazo. Melhorar as condições de trabalho é fundamental, e ao adicionar meios robotizados isso seria possível, uma vez que, “Uma impressora pode quebrar, mas [ninguém] ficará ferido ou morrerá” *ipsis litteris* de Adaloudis & Roca (2021). Além disso, para modernizar a IC o vice-

presidente e também primeiro-ministro dos Emirados Unidos afirmou em 2016 que 25% dos edifícios em Dubai serão feitos recorrendo a impressão 3D em 2030 (All3DP@, 2016).

Por outro lado, a impressão 3D é uma tecnologia ainda pouco frequente entre as empresas da IC, sendo mídias sociais e a metodologia BIM as mais usadas, segundo Alaloul et al. (2020). As aplicações do FA e de outros meios robotizados ainda são recentes. Em Lima et al. (2021) e Xia et al. (2018), é possível encontrar mais informações acerca da responsabilidade social da IC e o estado da arte da sustentabilidade no sector da construção civil, da mesma maneira que os principais desafios do sector.

2.3.3 Fabrico Aditivo Aplicado ao Mercado da Construção Metálica

O mercado do FA para todas as indústrias com a utilização do aço como matéria prima, encontra-se em expansão, com base no relatório Wohlers (2019) (*vide* Figura 2.8). Apesar de 50% de todo o aço produzido ser usado na IC, a utilização do FA na indústria da construção metálica ainda se encontra num estado inicial (World Economic Forum, 2016). A aplicação do FA tem grande impacto na IC, sobretudo, em ligações metálicas. Sendo possível realizar processos de otimização e tornar as ligações mais eficientes com um menor custo de material, geometrias otimizadas e alta eficiência estrutural (Galjaard et al., 2015).

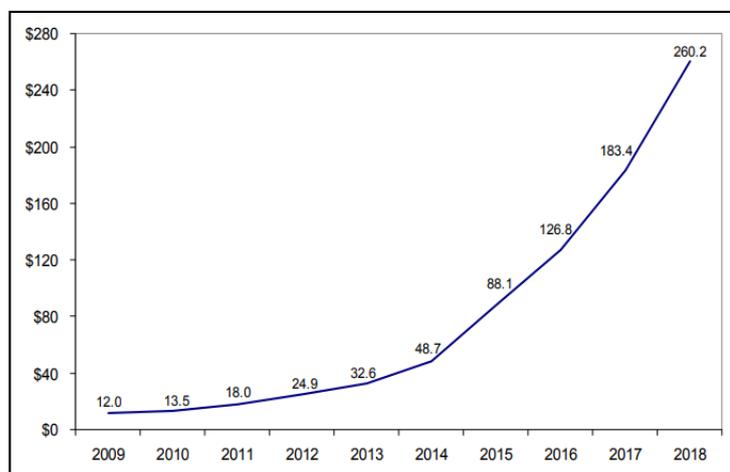


Figura 2.8 – Receita gerada pelo FA aplicado ao aço.¹⁶

Fonte: Wohlers Associates; Wohlers (2019) – página 4.

Em 2014, a empresa ARUP realizou a impressão de um nó metálico (*vide* Figura 2.9) (Galjaard et al., 2015). De modo similar, a empresa MX3D em parceria com a empresa japonesa Takenaka apresentou recentemente uma ligação com caratér misto: aço mais solução de argamassa (*vide*

¹⁶ Os valores apresentados encontram-se em milhões de dólares (moeda americana).

Figura 2.10). Essa ligação mista foi realizada imprimindo as paredes da ligação em aço inoxidável duplex através de WAAM, e por fim a introdução da argamassa, sendo possível obter uma redução de cerca de 50% da massa inicial (MX3D@, 2021).

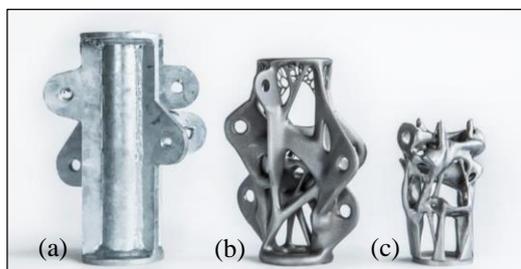


Figura 2.9 – Ligação otimizada pela ARUP.
 (a) Nó tradicional. (b) Otimização 1.
 (c) Otimização 2.

Fonte: Galjaard et al. (2015) – página 9.



Figura 2.10 – Ligação otimizada pela MX3D e Takenaka.

Fonte: MX3D@ (2021).

Essas novas aplicações exigem que o processo atual de dimensionamento de elementos metálicos e códigos reguladores sejam revistos para se adaptarem a esta nova realidade (World Economic Forum, 2016). A intercomunicação entre robôs autónomos, *softwares de design* e processamento de dados, aliados a um processo de soldadura eficiente, são os meios utilizados pelo FA para concretizar a otimização de uma peça. Aplicações mais avançadas, como a impressão de uma ponte pedonal foi realizada pela MX3D (*vide* Figura 2.11). Este exemplo destaca uma das dificuldades do FA aplicada à construção de peças de grande dimensão, a limitação do tamanho da peça impressa. Como solução desta dificuldade, foi necessário imprimir partes separadas e depois conjugá-las. Em adição, foi necessário realizar um estudo estrutural para confirmar como seriam conectadas as diferentes partes (Karayel & Bozkurt, 2020).

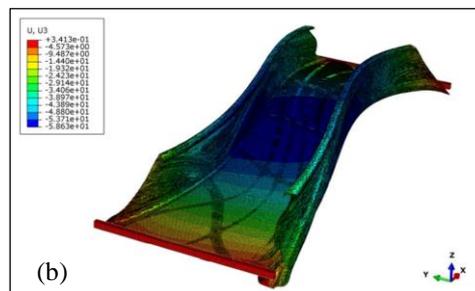


Figura 2.11 – Ponte desenvolvida pela MX3D.
 (a) Ponte impressa em 3D, sendo testada e (b) Análise numérica.

(a) - Fonte: MX3D@ (2021). / (b) – Fonte: Buchanan & Gardner (2019) – página 9.

3 ASPETOS GERAIS DO FABRICO ADITIVO

3.1 Introdução

Atualmente não existem códigos reguladores, no âmbito do dimensionamento estrutural de estruturas da construção civil, para a realização de projetos em FA. Todavia, existe em outras indústrias uma metodologia para realizar este tipo de projeto chamada de *design for additive manufacturing* (DfAM). Na Tabela 3.1 encontram-se indicadas as fases do DfAM, o objetivo de cada uma e os *softwares* mais utilizados em cada fase (N., N., 2009). Para melhor compreensão desta temática é fulcral a realização de mais estudos, a fim validar o processo de dimensionamento e melhorar a perceção das técnicas e materiais utilizados. Aplicações mais avançadas do DfAM associados com ML são estudadas e descritas por Wang et al. (2020).

Tabela 3.1 – Fases do DfAM e suas respetivas definições.

Fase	Descrição	Softwares utilizados	Referência
Fase 1 (ideia do produto)	Recorre-se a formulação da ideia do produto a ser elaborado pelo FA, ou que será sujeito a um processo de otimização.	-	(N., N., 2009)
Fase 2 (modelação 3D)	Na Fase 2 é criado um modelo 3D da peça. O modelo 3D será usado para a criação de uma superfície, ou um sólido, sendo futuramente convertido para o formato STL.	3D Slash / 3DS Max Blender / BRL-CAD Cinema 4D / Wings3D DesignSpark Mechanical FreeCAD / Fusion 360 Inventor / Maya / Modo MoI 3D / OpenSCAD Rhino3D / SketchUp SolidWorks / Tinkercad	(3dprinting@, 2021) (N., N., 2009) (Vaneker et al., 2020)
Fase 3 (validação estrutural)	Com o modelo 3D construído, na Fase 3, recorre-se a uma análise estrutural da peça, para confirmar a resistência da mesma associado ao material a ser utilizado. É possível, ou não, estudar um processo de otimização da peça, com base nas cargas de projeto. A validação estrutural é fulcral no DfAM, uma vez que, evidenciará os pontos fortes e fracos da peça, podendo ser realizada em <i>software</i> de elementos finitos. A otimização pode ser feita com os <i>softwares</i> comerciais indicados ao lado. A peça obtida no processo de otimização passará por uma fase de uniformização da superfície através de técnicas de suavização de superfície e/ou de engenharia reversa (redesenho da peça).	Altair OptiStruct; Ansys; FEMtools Optimization; Fusion 360; Generate-NX; Inventor; Karamba3D; MSC Nastran; OPTISHAPE-TS; Optistrustruct-Hyperworks; PERMAS-TOPO; Simulia Tosca – ABAQUS; SOLIDFEM; SolidThinking Inspire; SolidWorks; Vanderplaats Genesis; Within Enhance.	(N., N., 2009) (Reddy et al., 2016)
Fase 4 (poligonização triangulação) ¹⁷	Na Fase 4 com a peça já definida e validada, eventualmente otimizada realizar-se-á um processo de preparação da peça para ser lida pelo <i>software</i> e pelas máquinas de fabrico, onde o modelo 3D obtido da	-	(N., N., 2009) (Vaneker et al., 2020)

¹⁷ Para maiores detalhes acerca do processo de triangulação e do processo de formação de STL, recomenda-se a leitura de Kumar et al., 2001.

Fase	Descrição	Softwares utilizados	Referência
	engenharia reversa é convertido em um sólido, para de seguida ser convertido em um arquivo STL.		
Fase 5 (<i>slicing</i>)	Com o ficheiro no formato STL, é possível realizar o <i>slicing</i> da peça, onde serão definidos os parâmetros do processo de impressão. Assim sendo, é possível gerar a trajetória de pontos que o robô efetuará e proceder à simulação da impressão de forma virtual. Eventualmente, será constatado nesta fase possíveis mudanças, como a necessidade de impressão com suporte, sendo necessário refazer fases anteriores.	3DPrinterOS; ideaMaker; KISSlicer; OctoPrint; PrusaSlicer; Repetier; Simplify3D; Slic3r; Ultimaker Cura.	(N., N. , 2009)
Fase 6 (fabrico aditivo)	Na fase 6 a peça é produzida, segundo a categoria de impressão determinada em projeto e os parâmetros de impressão definidos.	-	(N., N. , 2009)
Fase 7 (pós-tratamento)	Objetivo na fase 7 é obter uma peça final pronta para uso. Depois da impressão da peça, poderá ser necessário realizar algum tipo de pós tratamento. Alguns exemplos de pós tratamento são: alívio de tensão; remoção de peças; tratamento térmico: pressão isostática a quente; usinagem; tratamentos de superfície e inspeção e teste.	-	(N., N. , 2009) (Vaneker et al., 2020)
Fase 8 (ensaio destrutivo)	O ensaio destrutivo é a forma atual de validar o dimensionamento estrutural efetuado, e comprovar o bom funcionamento da peça, ou não, em serviço.	-	(N., N. , 2009)

O DfAM busca realizar um processo otimizado e eficiente, em toda a sua dimensão. Uma das principais barreiras no avanço do FA é a falta de conhecimento das técnicas, métodos e ferramentas do DfAM (Vaneker et al., 2020). Há barreiras a serem superadas para o fabrico aditivo aplicado ao metal, pois os processos ainda são lentos, exigem preparação complexa, necessidade de pós tratamento, bem como, maquinaria cara. Tornando assim um processo com pouca viabilidade económica em sua aplicação na IC, o que é refletido no baixo número de empresas que atuam neste nicho. Espera-se que esse tipo de tecnologia se torne mais eficiente que os métodos atuais, não sendo possível, naturalmente, substituir toda a forma de construção pelo FA, apenas nos projetos que seja comprovada a sua eficiência estrutural, económica e sustentável. Portanto, o capítulo 3, será dedicado a explorar as diferentes fases de um DfAM, como também as suas potencialidades.

3.2 Validação Estrutural

3.2.1 Otimização Topológica (OT)

Uma das grandes vantagens da utilização do FA é a possibilidade de obter estruturas mais otimizadas. Isto posto, realizar um processo de otimização parece ser fundamental, conquanto não é obrigatório. A otimização mais comum no DfAM é a otimização topológica (OT). Em Bendsøe (1995) é possível encontrar a base teórica da modelação matemática utilizada no desenvolvido de algoritmos de otimização. De acordo com Gonçalves (2018), para se obter peças com melhores comportamentos estruturais, é preciso estudar processos de otimização que explorem uma maior eficiência estrutural, gerando assim menos desperdícios. Para realizar a otimização é necessário recorrer a uma análise estrutural da peça utilizando o método dos

elementos finitos (MEF), para o qual o refinamento da malha assumido condiciona a otimização, como ilustrado na Figura 3.1, tal como, as condições de fronteira, as cargas aplicadas, o material e a aplicação de restrições.



Figura 3.1 – Influência da malha de elementos finitos, na otimização topológica. Exemplo de uma ponte.
(a) Sólido inicial, (b) Malha com 1 milhão de elementos e (c) Malha com 33 milhões elementos.

Adaptado de: M2DO@ (2021a).

Um processo de otimização pode ser dividido em três tipos: otimização paramétrica ou dimensional; otimização de forma e otimização topológica (Bendsøe e Sigmund, 2012). Na Figura 3.2. ilustra-se essas categorias de otimização. A otimização paramétrica ou dimensional não altera a topologia da estrutura, as variáveis recorrem a características geométricas, como: a espessura; a área transversal entre outras variáveis dimensionais. A otimização de forma tem o objetivo de realizar as alterações dos contornos de determinadas formas, como a localização das cavidades, tornando-se num processo mais complexo que a otimização dimensional. Em Mam et al. (2020) encontra-se um exemplo de otimização de forma aplicado a edifícios.

Quando se deseja alterar a forma ou a estrutura topológica da estrutura é necessário recorrer a uma OT com base em uma função objetivo e um conjunto de restrições, sendo assim possível encontrar a solução adequada para um caso de carga. Uma categoria recente de otimização foi desenvolvida e a sua base teórica envolve as outras três categorias citadas, chama-se otimização topográfica, a qual possui grande complexidade (Lalo, 2015).

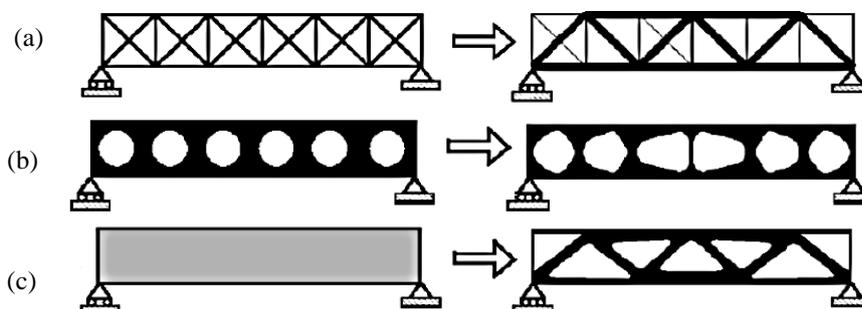


Figura 3.2 – Categorias de otimização.
(a) Otimização paramétrica ou dimensional, (b) Otimização de forma e (c) Otimização topológica.

Fonte: Bendsøe e Sigmund (2012).

A otimização recorre a uma função objetivo $f(x)$, que terá o objetivo de maximizar ou minimizar o parâmetro (x), como minimizar o volume, o peso, ou a tensão atuante. Esta está sujeita a um conjunto de restrições (Expressão 3.2) e (Expressão 3.3), que são estabelecidas caso a caso de acordo com o objetivo pretendido (Arora, 2012). Onde tem-se \bar{g}_j como restrição de desigualdade j e $g_j(x)$ como função de desigualdade. No caso da restrição $x_i(x)$, para a OT, recorre-se a uma indicação binária, 0 ou 1, para validar se um determinado espaço possui ou não uma parte sólida. Como já destacado, o volume e a forma ocupada por esse espaço dependem da malha de elementos finitos assumida, sendo o valor unitário referente ao espaço sólido (espaço onde há matéria), e o zero para um espaço vazio (espaço ao qual não contribui de forma efetiva para o objetivo da otimização; designa que não há matéria neste espaço em causa), como ilustrado na Figura 3.3.

$$\text{função objetivo:} \quad f(x) \tag{3.1}$$

$$\text{sujeito à:} \quad g_j(x) \leq \bar{g}_j \tag{3.2}$$

$$x_i(x) = \begin{cases} 1 & \text{for } \Omega_s \\ 0 & \text{for } \Omega_v \end{cases} \tag{3.3}$$

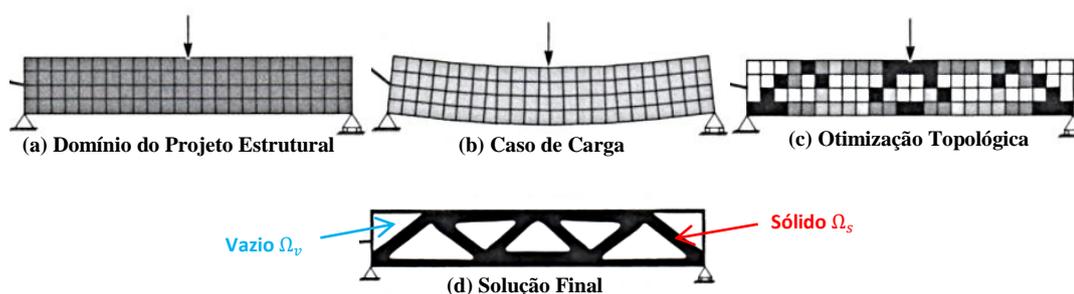


Figura 3.3 – Otimização de uma viga simplesmente apoiada.

Adaptado de: Bendsøe e Sigmund (2012).

Para concluir devidamente a otimização, na realização de peças impressas, é preciso recorrer a engenharia reversa, de forma a deixar a peça com um formato similar ao da peça otimizada com um contorno suave e uniforme (*vide* Figura 3.3d). A engenharia reversa consta de redesenhar a peça com base na solução apresentada na otimização. Tendo aliado ao processo da engenharia reversa a utilização de técnicas de suavização de superfície (que precisam ser feitas com o devido cuidado pois podem retirar ou acrescentar matéria além do que é essencial na peça final). Após realizar o processo de engenharia reversa, é importante realizar novamente uma validação estrutural da peça. Para esta análise estrutural é importante verificar o acúmulo de tensões na peça otimizada, que poderá vir a ser um ponto crítico, com potencial de provocar a rotura da peça. Na Figura 3.4, mostra-se uma comparação entre duas soluções prevendo, ou não, o

acúmulo de tensões numa singularidade. Neste exemplo para resolver o problema introduziu-se uma função objetivo que minimizava a tensão p -norm.

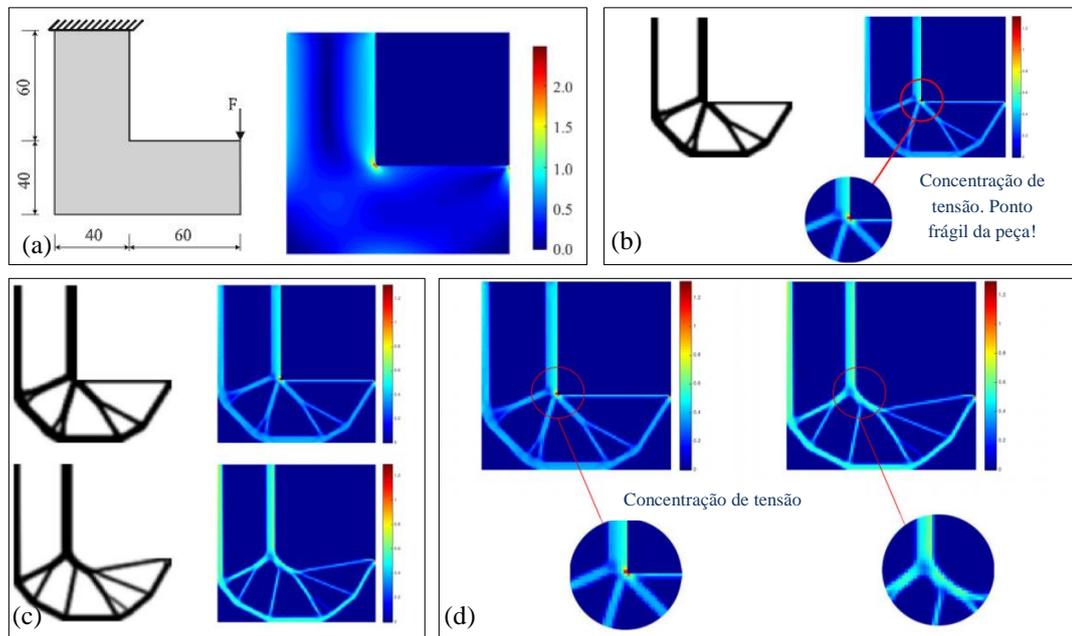


Figura 3.4 – Análise do acúmulo de tensão.

(a) Exemplo de suporte em L, domínio de projeto e campo de tensões de von Mises, (b) Solução de topologia e tensão de von Mises para máxima rigidez, (c) Solução com minimização do p -norm da tensão e (d) Comparação entre as soluções.

Adaptado de: Picelli et al. (2018) e M2DO@ (2021b).

3.3 Slicing

Os parâmetros de impressão são determinantes na qualidade da peça final, em Liu et al. (2020) encontra-se uma lista dos principais parâmetros a ter-se em conta ao realizar um processo de fabrico para diferentes categorias de impressão, da mesma maneira que, os principais parâmetros de pós-tratamento. O processo de *slicing* consiste em realizar uma simulação da impressão camada a camada das trajetórias de pontos que o robô terá de seguir no processo de impressão (*vide* Figura 3.5). Sendo definida inclusive a orientação da peça em relação à plataforma de trabalho, neste momento é que a estratégia de impressão será concretizada. Mas para a produção ter êxito é preciso, desde o início do DfAM, saber quais são as limitações que a maquinaria possui, de forma a estabelecer a melhor estratégia de impressão. Eventualmente, terá que se retornar algumas fases atrás no processo de DfAM e refazer a validação estrutural e/ou a otimização por não se ter previsto corretamente esta fase.

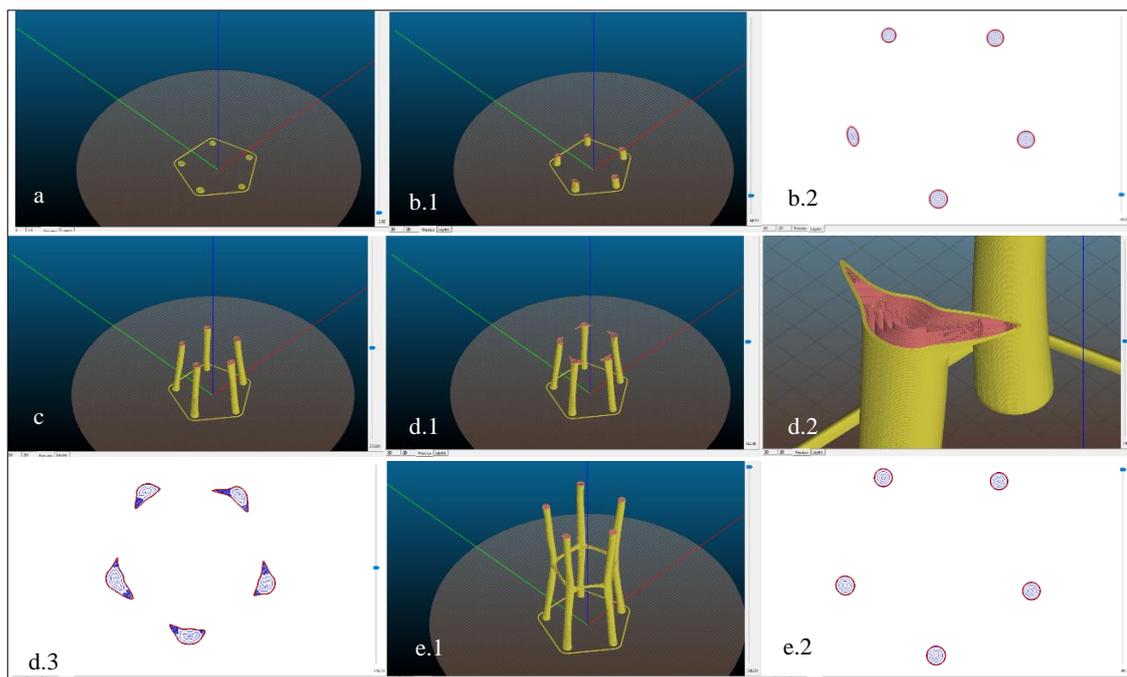


Figura 3.5 – Evolução do *slicing*, em diversas camadas no *software* Slic3r, a utilizar o *infill* com trajetórias concêntricas. Desde a camada inicial (a) até a última camada (e).

Em b.2, d.3 e e.2 encontra-se ilustrado o detalhe de impressão das camadas em plano. Em d.2 encontra-se destacado com evolui o *slicing* em zonas de variação de inclinação. E nas restantes encontra-se ilustrado camadas do *slicing* em 3D.

Com a estratégia de impressão definida, e com os parâmetros da impressão estabelecidos, é possível realizar uma simulação virtual do processo de impressão, antes de realizar a impressão real. De forma a averiguar se a impressão está a ocorrer da forma pretendida e se os parâmetros estabelecidos são os ideais. Essa simulação é uma mais-valia, pois ela permite antecipar eventuais erros que não foram destacados nas fases anteriores, maximizando assim a eficiência do processo. A realização da simulação não é obrigatória, mas ajuda a prever erros, sendo portanto indicado realizar a simulação do *slicing* e de seguida a simulação da construção em um sistema *digital twin* (DT) de forma colaborativa (Zhang et al., 2019).

É possível limitar as inclinações limites de impressão desde do início e realizar um processo de otimização com uma restrição de *overhang* (vide Figura 3.6) ou dispor de zonas congeladas (*frozen area*) na peça durante a otimização, para terem a função de suporte, por exemplo (Gaynor & Guest, 2016; Wang et al., 2018). Há diferentes formas de realizar o *slicing* adotando trajetórias concêntricas, retangulares entre outras, sendo importante analisar caso a caso e definir qual é a melhor forma de realizar a impressão. Notoriamente esta escolha é dependente

da maquinaria e experiência da equipa de trabalho, para além do objetivo do projeto em causa (Jafari et al., 2021).



Figura 3.6 – Resultado da otimização de uma viga com restrição de *overhang*

(a) Caso 1: com ângulo de 30°, (b) Caso 2: com ângulo de 45° e (c) Sem restrição de *overhang*.

Fonte: Wang et al. (2018) – página 17.

3.4 Ensaio Destrutivo

Para validar a resistência da peça, aconselha-se a realização de ensaios destrutivos. O processo de FA introduz, como já referido anteriormente, tensões residuais e distorções na peça fabricada, e essas imperfeições são dependentes da(o): ambiente da impressão; experiência do corpo técnico; maquinaria; material; parâmetros de impressão; categoria de impressão; tamanho da peça e processo de soldadura. Neste momento, ainda não existe forma de calcular estas imperfeições, assim sendo a realização de um ensaio destrutivo é a forma mais fiável de validar a eficiência estrutural da peça. A necessidade de validar o dimensionamento em um teste realizado a escala 1:1 é uma das desvantagens da utilização do FA. Desta forma, para se validar um projeto de uma ponte, por exemplo, seria necessário imprimi-la duas vezes, o que torna o custo final demasiado elevado. Uma solução é a elaboração de um DT para elaboração dos testes, com recurso de ML e IA, como destacado em Adaloudis & Roca (2021).

Os autores, Tarus (2020) e Weber (2020) realizaram ensaios de caracterização das propriedades mecânicas do aço para peças produzidas em WAAM, com o intuito de obter melhor perceção do comportamento do material. Bem como Laghi et al., 2020 elucidou um ensaio, com o material 308LSi aço inoxidável. No qual se efetuou um estudo da aplicação de WAAM no âmbito da engenharia civil a fim de analisar as propriedades geométricas e mecânicas do material. Para além de estudar as irregularidades superficiais, realizou testes à tração e à compressão, determinação do módulo de Young e análise do comportamento pós-elástico. Após um tratamento estatístico obteve-se as seguintes conclusões:

- as propriedades mecânicas são afetadas pela orientação do processo de impressão¹⁸;

¹⁸ Este ponto é contrariado por Tarus (2020), uma vez que, a mesma conclui que se o processo de impressão for bem executado a direção do corte não possui influência relevante nas características do material.

- discrepância notória entre as espessuras nominais e efetiva;
- imperfeição de cerca de 1/300, do comprimento da peça, para o estudo de tubos ocios;
- valor do módulo de Young muito inferior a materiais convencionais.

Ensaaios em peças SHS, CHS e RHS são apresentados em Yan et al. (2019), a utilizar PBF. Não obstante Buchanan et al. (2017) e Buchanan et al. (2018) realizaram ensaios em CHS e SHS, utilizando PBF e WAAM (*vide* tabela 3.2).

Tabela 3.2 – Ensaaios de compressão em *stub columns*, para secção oca, utilizando FA.

Adaptado de: Zhang et al. (2021).

Material	Método de Manufatura	Secção	No. de Teste	$\sigma_{0.2}$ (N/mm ²)	Referência
308LSi aço inoxidável	WAAM	CHS	4	326	(Buchanan et al., 2018)
308LSi aço inoxidável	WAAM	SHS	4	326	(Buchanan et al., 2018)
308LSi aço inoxidável	WAAM	CHS	9	307	(Laghi et al., 2020)
316L aço inoxidável	PBF	SHS	5	409	(Buchanan et al., 2017)
316L aço inoxidável	PBF	CHS	5	422	(Zhang et al., 2021)
H13 <i>tool steel</i>	PBF	SHS/RHS	17	707-1468	(Yan et al., 2019)
H13 <i>tool steel</i>	PBF	CHS	10	707-1468	(Yan et al., 2019)

Zhang et al. (2021) realizou um estudo para avaliar o comportamento de um CHS *stub column*, sujeito a um processo de fabrico da categoria PBF, com um material 316L aço inoxidável. O objetivo do estudo foi medir as imperfeições introduzidas no fabrico, através da medição a *laser*, realizar testes à tração e testes à compressão axial. Comparou-se os resultados dos ensaios com as peças feitas pela fabricação convencional, em específico em aços enformados a frio e da aplicação da categoria de impressão DED, obtendo resultados próximos entre PBF e DED. O estudo evidenciou a necessidade de estudar peças mais otimizadas para verificar a aplicabilidade das mesmas comparativamente às soluções tradicionais. As peças ensaiadas possuíam encurvadura local, segundo afirmação do autor.

3.5 Robótica

No momento atual existe um grande conjunto de robôs, com funções e parâmetros específicos para materiais e para cada categoria de FA. Para deixar a IC mais competitiva há uma tendência nova no mercado da construção civil, a introdução de meios robotizados com o objetivo de tornar o *life cycle assessment* (LCA) mais eficiente e mais seguro para os trabalhadores (Kim et al., 2015).

Shen et al. (2019) realizaram uma análise acerca da implantação de múltiplos robôs na escala de produção para melhorar a eficiência de impressão. Permitindo assim, que as limitações do volume de impressão sejam expandidas, pois um sistema colaborativo de robôs foi aplicado, associado a um algoritmo de otimização de trabalho. DED é a única categoria de FA, aplicada ao aço, que possui a habilidade de processar pó ou arames metálicos à utilizar múltiplos graus de liberdade (DOF), sendo assim ideal para associar robôs durante o processo de fabrico. Na Figura 3.7 ilustra-se as principais fases necessárias para produzir peças através de um braço robótico com 6 graus de liberdade (Urhal et al., 2019).

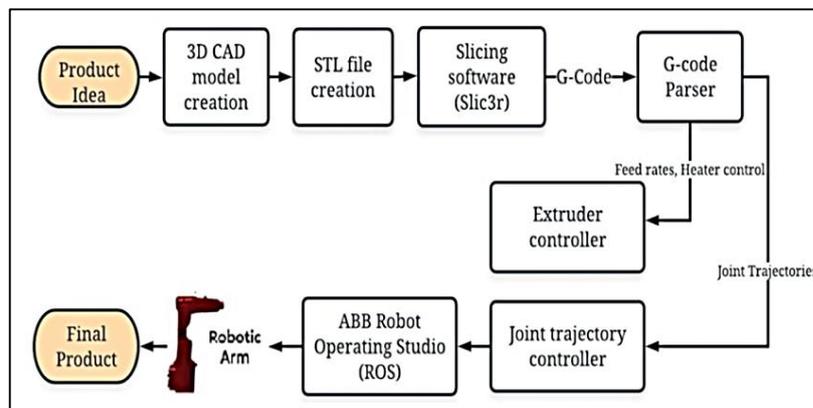


Figura 3.7 – Fluxograma de informações do sistema de impressão multiplano. Desenvolvido por pesquisadores da Virgínia Tech, usando ABB IRB 1200-7 braço robótico com 6-DOF.

Adaptado de: Urhal et al. (2019).

Um dos desafios é que os *softwares* de *slicing* ainda não são habilitados a gerarem o *G-code*¹⁹, essa tarefa é realizada a parte. Em resumo, o fluxo de trabalho inicia-se por escolher a peça a ser impressa, cria-se um modelo CAD 3D, converte-se para um ficheiro em formato STL, realiza-se o *slicing* da peça, de seguida gera-se o *G-code* e por fim obtém-se a trajetória de pontos a ser enviado para o braço robótico que executará o produto final (Urhal et al., 2019).

Alguns autores defendem a utilização de DT associado à manipulação dos robôs (Cai et al., 2020; Liu et al., 2020; Malik & Brem, 2021). O DT é um modelo virtual em tudo semelhante ao modelo físico, que permite reproduzir virtualmente o espaço e a maquinaria de fabrico, tal como, comandar constituindo assim um sistema de automação inteligente. Atualmente com a pandemia do COVID-19, houve uma maior validação deste conceito, existindo aplicações em trabalhos desde a NASA até indústrias de menor porte. Uma vez que permite monitorizar em

¹⁹ Um *G-code* é um código escrito num formato que as máquinas compreendem, para executar uma determinada tarefa, utilizando em comando numérico computadorizado (CNC). Ou seja, após a obtenção do arquivo em formato STL, e do estudo das trajetórias é preciso um *G-code* para realizar a comunicação com o sistema.

tempo real e controlar à distância os robôs e desenvolver trabalhos complexos²⁰. Devido a complexidade dos processos de fabrico atuais, a utilização de DT ajuda a prever erros de forma atempada, através de ferramentas de simulação em tempo real ou avançado do processo de fabrico.

A utilização de DT ajuda a evitar acidentes com humanos, do mesmo modo que, minimiza o desperdício, ajuda na tomada de decisão e permite a realização de treinamentos computacionais com recursos de ML. A adoção do DT associado a outras tecnologias, como IoT²¹, promove um processo de manufatura extremamente eficiente, pois a IoT permite a intercomunicação entre os robôs e outras máquinas presentes em uma indústria de fabrico (Elahi & Tokaldany, 2021). É possível expandir o domínio tecnológico com aplicações de técnicas de ML e IA, por consequência tornando o processo dinâmico e integrado, com a geração de *big data*, permitindo um aprimoramento constante do processo de fabrico.

De acordo com Liu et al. (2020) é necessário realizar uma gestão colaborativa de dados entre o DT e os sistemas robotizados. E essa gestão correlaciona cinco etapas: o *design* do produto; o planeamento do processo; a manufatura ou processo de impressão; o pós-processamento ou pós-tratamento e por fim a medição de qualidade. A gestão colaborativa de dados associado ao DT, consiste em obter e armazenar os dados do fabrico e integrar com os dados dos consumidores e gestores de projeto para realizar a análise de dados através de múltiplas interfaces. Na Figura 3.8 é possível observar a relação da gestão colaborativa de dados do DT com o FA para elementos metálicos (Liu et al., 2020).

²⁰ Os trabalhos dos sistemas de manufatura eram considerados simples, na primeira revolução industrial, caóticos na segunda, complicados na terceira, e na quarta são considerados complexos (Malik & Brem, 2021).

²¹ Segundo World Economic Forum (2020b), IoT é a principal tecnologia do futuro, a que possui a maior capacidade de mudar as cadeias de produção.

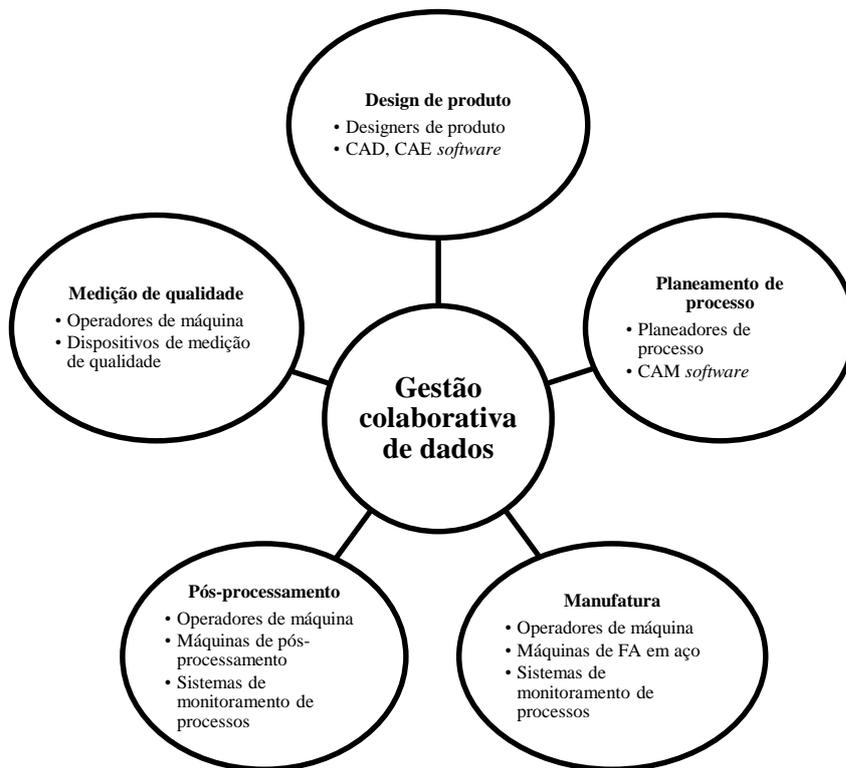


Figura 3.8 – Estrutura conceitual de gerenciamento de dados colaborativo habilitado para utilizar DT na aplicação do FA em elementos metálicos.

Fonte: Liu et al. (2020) – página 4.

4 CAMPANHA EXPERIMENTAL

4.1 Projeto

A presente dissertação foi elaborada no conjunto de trabalhos desenvolvidos pelo projeto AMConstruction – *Additive Manufacturing in Steel Construction*, inserido no âmbito do *Centre for Mechanical Engineering, Materials and Processes – CEMMPRE* e *Institute for Sustainability and Innovation in Structural Engineering – ISISE* localizados na Universidade de Coimbra. O projeto encontra-se situado no Laboratório de Fabrico Aditivo da Universidade de Coimbra. O objetivo do estudo é usar o FA com recursos de automação na IC, utilizando aço como material de impressão. O estudo principal do projeto AMConstruction é a execução por FA de nós complexos em estruturas de grande extensão. A utilização da automação na IC implica maiores facilidades na execução de geometrias complexas, aplicações *in situ* e simulação virtual do processo construtivo (Pires, J. N. & Tankova, T., 2020). O conceito do projeto é apresentado na Figura 4.1.

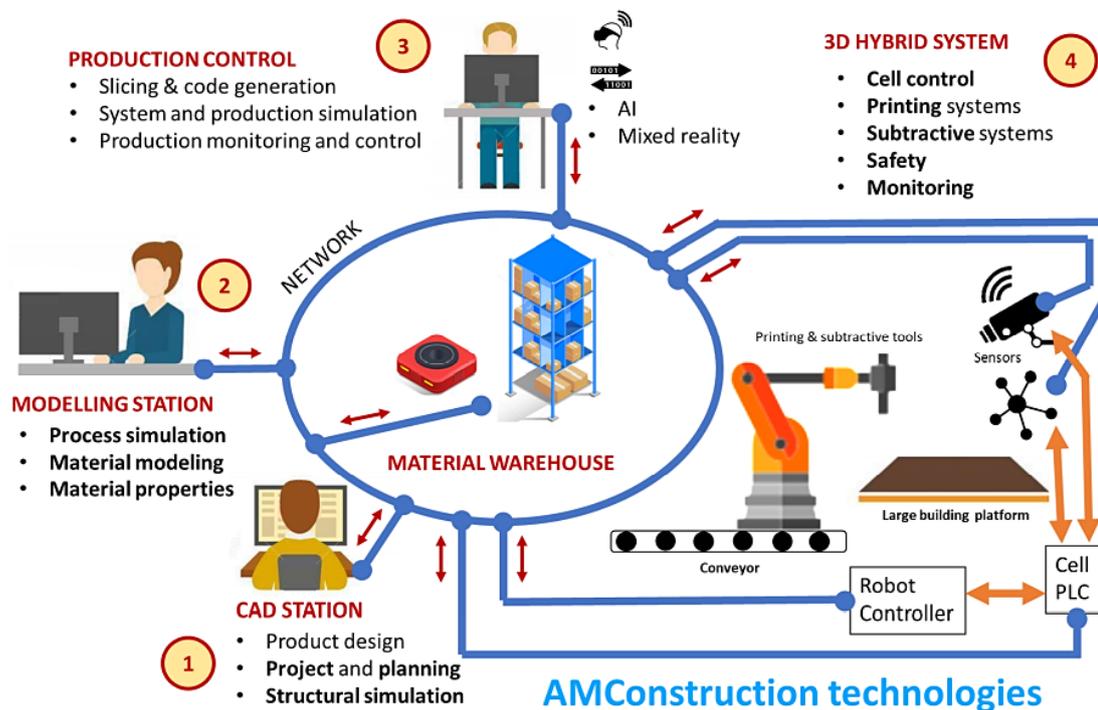


Figura 4.1 – Conceito do Projeto AMConstruction.

Fonte: Pires, J. N. & Tankova, T. (2020).

O conceito do projeto consiste em:

- definir a peça e os objetivos do projeto;
- modelação do *design* da peça;
- melhor perceção das propriedades dos materiais;
- realização de um processo interativo da definição do *design* mais funcional;
- validação estrutural da solução apresentada.

Com a peça definida e com a validação estrutural realizada segue-se para a etapa do controlo de produção, com simulação do processo construtivo, *slicing*; geração do *G-code* e por fim a realização da simulação virtual recorrendo a um sistema DT. Com esta etapa finalizada procede à construção da peça através do sistema de FA escolhido.

4.2 Laboratório – Sistema de Fabrico Aditivo WAAM

Salienta-se a importância de ter um espaço devidamente preparado para receber este tipo de atividade, como um corpo técnico com experiência. Na Figura 4.4 é ilustrado a estrutura do Laboratório de Fabrico Aditivo da Universidade de Coimbra, utilizada na criação de peças impressas por WAAM. O sistema é composto por um(a):

- braço robótico ABB IRB 4600, o qual se desloca por uma plataforma de deslocamento ABB IRBT 2005 com 5 metros de extensão;
- central de manutenção da tocha;
- controlo manual do sistema robotizado e da soldadura;
- mesa de impressão, composta por duas mesas quadradas 1.5 x 1.5 m de extensão, cada;
- mesa de operação;
- sistema de gases de proteção com duas botijas de gás, uma de Argon e outra de CO₂;
- sistema de soldadura CMT da Fronius TPS 400i com CMT e 400i nc MIG/MAG;
- sistema DT, para simulação e controlo do processo de soldadura;
- sistema extração de ar, devido a liberação de gás durante o processo de soldadura;
- substrato que se encontra diretamente ligado a um cabo de soldadura;
- tocha de soldadura que está associada ao braço robótico.



Figura 4.2 – Estrutura laboratorial para a categoria DED-WAAM.

4.3 Metodologia

Para a realização dos ensaios experimentais e das análises numéricas, segue-se as fases de análise, produção e validação, apresentados na Tabela 4.1. A metodologia de trabalho desenvolvida foi resultado da revisão bibliográfica apresentada nesta dissertação, bem como dos conceitos e etapas de trabalho apresentado no projeto AMConstruction.

Tabela 4.1 – Metodologia utilizada na campanha experimental.

Etapas	Descrição
Testes preliminares da maquinaria	Realização de testes de funcionamento do braço robótico, de forma a concluir se está apto para realizar o processo de fabrico. Para tanto, verifica-se o funcionamento da plataforma de deslocamento, do raio de giração do robô, e se a central de manutenção da tocha se encontra apta a cortar o fio, lubrificar, limpar e calibrar a tocha. Incluindo nesta análise inicial a verificação do controlo manual do sistema robótico.
Testes preliminares do material	Realização da impressão de provetes testes, para melhor perceção dos parâmetros de impressão e do resultado do material impresso, verificando se o comportamento do material utilizado corresponde ao esperado. Bem como, analisando se a estratégia de impressão e as trajetórias de pontos encontram-se coerentes com a simulação do <i>slicing</i> .
Testes preliminares do sistema de soldadura	Validação da funcionalidade do sistema de soldadura, sistema de gases de proteção e da exaustão dos gases resultantes da soldadura, bem como avaliar a formação do arco-voltaico.
Calibração do DT	Verificar se as simulações reais e virtuais estão alinhadas no DT, e como interligar os parâmetros de impressão no DT. Salienta-se que o sistema DT utilizado encontra-se em fase de elaboração por parte da equipa técnica do projeto, desta forma, o trabalho de impressão neste momento inicial ocorre em ritmo de testes, e não de produção efetiva.
Peça	Escolha da peça que será submetida a análise estrutural, otimização e fabrico. E em que âmbito ela está inserida.
Modelação 3D	Modelação de um ficheiro CAD 3D da peça.
Verificação estrutural	Definição da carga de projeto. De seguida realizar-se-á uma análise elástica recorrendo a um <i>software</i> que utilize o MEF, para atestar o comportamento da peça submetida ao caso de carga definido.
Otimização	Realiza-se nesta etapa a otimização da peça, segundo um conjunto de restrições distintas. Para confirmar quais as restrições mais adequadas, antes de iniciar a otimização, realizou-se um estudo prévio com as restrições individualmente. A função objetivo e as restrições são definidas com base no estudo prévio.
Engenharia reversa	Após a obtenção da peça otimizada, exporta-se o arquivo da malha para ser convertido em um sólido e utiliza-se diferentes princípios na elaboração da engenharia reversa. Sempre recorrendo a validação estrutural e ao <i>slicing</i> , como apoio na elaboração de uma nova estratégia de engenharia reversa, em um processo iterativo.
<i>Slicing</i>	Com o sólido definido realiza-se o <i>slicing</i> da peça, de forma a comprovar o bom comportamento da peça submetida ao processo de impressão e verifica-se a eventual necessidade da adição de reforços. Recorre-se ao sistema DT para obter os parâmetros do <i>slicing</i> e de impressão, em um processo iterativo.
Validação estrutural	Realiza-se a comprovação do comportamento estrutural da peça, para de seguida ser criado o <i>G-code</i> . Essa comprovação é feita recorrendo a análises numéricas, realiza-se assim análises elásticas e plásticas com e sem imperfeição: <i>linear elastic analysis</i> (LA); <i>linear bifurcation analysis</i> (LBA); <i>material non-linear analysis</i> (MNA) e <i>geometrically and materially non-linear elastic analysis with imperfections</i> (GMNIA).
Fabrico Aditivo	Produção da peça impressa, através da categoria de impressão DED-WAAM, utilizando o sistema de soldadura CMT. A peça após o fabrico não receberá nenhum tipo de pós-tratamento.
Validação final	Comprovação da capacidade máxima da peça impressa através de ensaio experimental de compressão pura. Para realizar a comparação com as análises numéricas realizadas com as peças obtidas na engenharia reversa.

5 CASO DE ESTUDO

5.1 Apresentação do Estudo de Caso

No presente capítulo apresenta-se uma análise numérica e experimental de um *stub* sujeito a compressão simples, sendo o mesmo produzido através do FA. O objetivo é analisar a viabilidade estrutural da peça impressa em 3D ao se comparar com as soluções convencionais. Começa-se pela apresentação do caso de estudo, a descrição da análise numérica e termina-se com o ensaio experimental e os seus respetivos resultados.

O estudo de caso recorre à otimização de um troço de uma treliça através da otimização topológica, utilizando o Abaqus como *software* de validação estrutural e de otimização. Para o processo de impressão recorre-se a uma solução de impressão WAAM associado à tecnologia CMT. A componente estrutural escolhida para realizar o FA é uma treliça, baseada num exemplo apresentado em Simões (2014), indicado na Figura 5.1. A ação permanente do pavimento considerada é de 5.75 kN/m^2 e a ação variável é de 4.00 kN/m^2 , com uma carga de cálculo uniformemente distribuída no pavimento de 13.76 kN/m^2 .

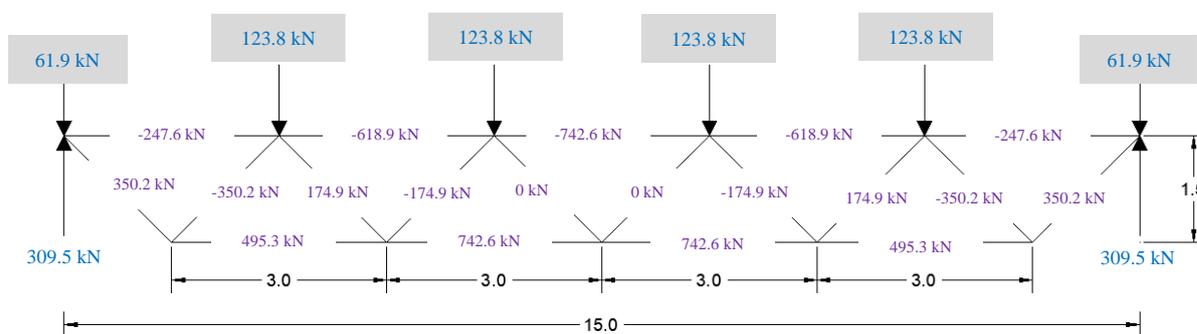


Figura 5.1 – Viga treliçada analisada no estudo de caso, com a indicação das ações e dos esforços.

Fonte: Simões (2014) – páginas 94 e 95.²²

5.1.1 Dimensionamento pelo Eurocódigo

Para os elementos à tração, assume-se que as seções CHS são ligadas entre si por soldadura, não é o objetivo deste trabalho analisar os elementos de ligação. O dimensionamento das barras tracionadas segue a indicação da NP EN 1993-1-1 (2010) § 6.2.3, como indicado na Expressão 5.1, para a solução mais económica.

²² As cordas superiores e inferiores possuem 3 m e as diagonais 2.12 m. Elementos com esforços axiais negativos, estão comprimidos. As duas diagonais centradas, com esforço axial nulo, assumem-se como secção de diagonal tracionada.

$$N_{ed} \leq N_{t,Rd} = \frac{A \times f_y}{\gamma_{M0}} \quad (5.1)$$

Para o pré-dimensionamento dos elementos à compressão considerou-se as secções com áreas superiores às mínimas, pois em geral a resistência à encurvadura é condicionante, considerando um comportamento plástico das secções que deverá ser validado ao classificar a secção. Para o pré-dimensionamento da secção em compressão recorre-se a NP EN 1993-1-1 (2010) § 6.2.4, transcrito na Expressão 5.2.

$$N_{ed} \leq N_{c,Rd} = \frac{A \times f_y}{\gamma_{M0}} \quad (5.2)$$

Admite-se secções submetidas à compressão pura para a verificação da classe das secções. Como ambas as secções possuem d/t inferior a $50\epsilon^2$, são de classe 1. Para a resistência à encurvadura, considerou-se que na direção perpendicular ao plano da estrutura todos os nós são contraventados. A verificação é feita com base nas Expressões 5.3 a 5.8, indicadas na NP EN 1993-1-1 (2010).

$$\lambda_1 = \pi \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (5.3)$$

$$\lambda = \frac{LE}{i} \quad (5.4)$$

$$\bar{\lambda} = \frac{\lambda}{\lambda_1} \quad (5.5)$$

$$N_{b,Rd} = \frac{A \times f_y \times \chi}{\gamma_{M1}} \quad (5.6)$$

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}}, \text{ com } \chi \leq 1,0 \quad (5.7)$$

$$\phi = 0.5 [1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0.2) + \bar{\lambda}^2] \quad (5.8)$$

A imperfeição para uma secção tubular acabada a quente, S420 corresponde à curva a. Para uma análise plástica tem-se $L/250$, por indicação do Quadro 5.1 da NP EN 1993-1-1 (2010) § 5.3.2. Esta é uma estimativa da imperfeição, não sendo idealizada para um processo de FA, mas decidiu-se usar esse valor de forma a avaliar o dimensionamento com os valores obtidos no ensaio. No Apêndice A, encontra-se o dimensionamento detalhado, no entanto na Figura 5.2 estão indicadas as secções obtidas.

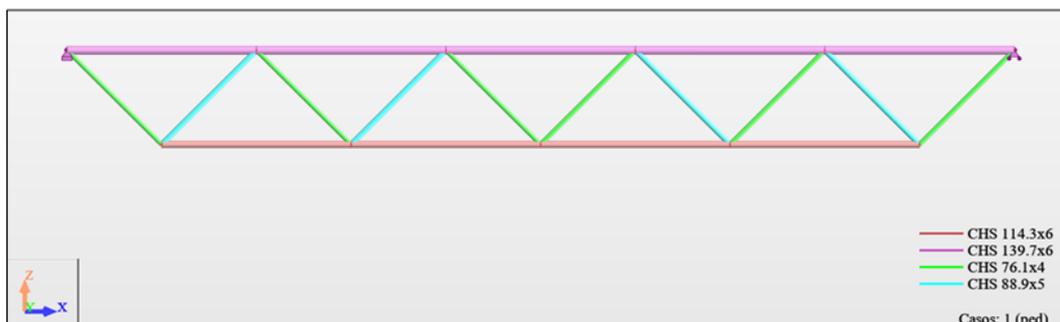


Figura 5.2 – Solução estrutural obtida no dimensionamento.

5.2 Análise Numérica

5.2.1 Modelação

A corda superior à compressão possui três metros, contudo utilizou-se um troço da treliça à compressão, sujeito a uma carga atuante de 742.60 kN, com 500 mm de comprimento, após se comprovar que para uma peça com 500 mm não há efeito de encurvadura global. Como apresentado no estudo conduzido por Zhang et al. (2021) espera-se encurvadura local. No caso de estudo obtém-se uma esbelteza normalizada de 0.812 para a peça com três metros de comprimento e 0.150 para a peça pequena de 500 mm.

Como já destacado anteriormente, para a utilização de FA é uma mais valia utilizar um processo de otimização. A partir da otimização é preciso realizar processos adicionais para a validação estrutural, tais como o *slicing* e a engenharia reversa. Por fim, com a validação estrutural feita procede a impressão. A modelação da peça foi realizada recorrendo ao Abaqus. Sendo os ficheiros CAD construídos no Inventor e depois exportados para o Abaqus. A peça submetida a análise encontra-se ilustrada na Figura 5.3, a qual possui 500 mm de extensão e um diâmetro de 139.7 mm. Valor esse igual do CHS dimensionado da corda superior, tendo uma massa de 10.5 kg.

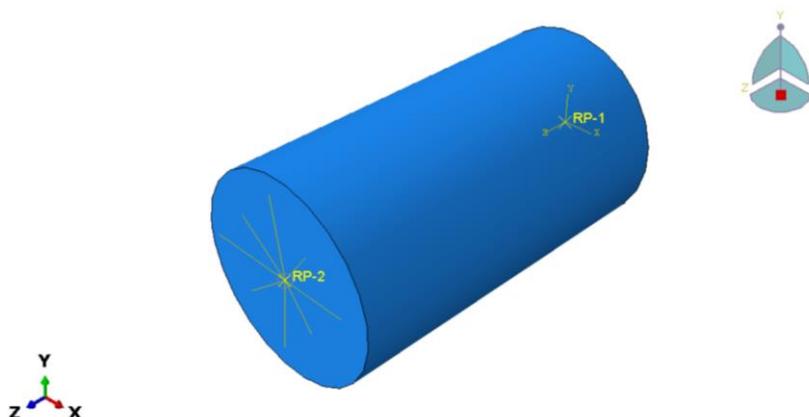


Figura 5.3 – Peça sólida inicial, modelo Abaqus.

A modelação da peça seguiu as indicações destacadas na Tabela 5.1. Realizou-se uma análise elástica anterior ao início da otimização, sendo essa feita para uma melhor compreensão do comportamento global da peça. A carga de projeto utilizada foi de 742.6 kN, com uma malha de 6 mm (valores inferiores promovem uma maior duração das simulações numéricas e maior espaço de armazenamento).

Tabela 5.1 – Parâmetros da modelação da peça para uma análise elástica.

Parte	3D deformable
Propriedades mecânicas do material	Comportamento elástico E = 210000 N/mm ² ν = 0.3
Assembly	Dependente (mesh on part) Static General NI geom off Time = 1
Step	Número máximo de incrementos = 500 Incremento máximo = 0.1 Incremento mínimo = 1E-05 Incremento inicial = 0.01
Restrições	Criou-se dois pontos de referência, RP1 (0,0,0) e RP2 (0, 0, 500), a estes dois pontos associou-se uma interação do tipo <i>coupling</i> (do género cinemático), com os 6 DOF fixos, em ambos os pontos.
Carga	Aplicou-se uma carga concentrada em RP1 de 742600 N, com distribuição uniforme.
Condição de fronteira	As condições de fronteira aplicadas são do tipo deslocamento/rotação. Em RP1 foi aplicado 5 DOF fixos e um livre, o grau livre foi o U3, referente o deslocamento ao longo do eixo z. Em RP2 todos os DOF são fixos.
Malha	A malha utilizada é de 6 mm, com controlo de curvatura.

Da análise elástica é possível concluir que a parte central do sólido é a parte que menos participa na resistência estrutural da peça (Figura 5.4), por conseguinte, a sua remoção promove maior eficiência estrutural.

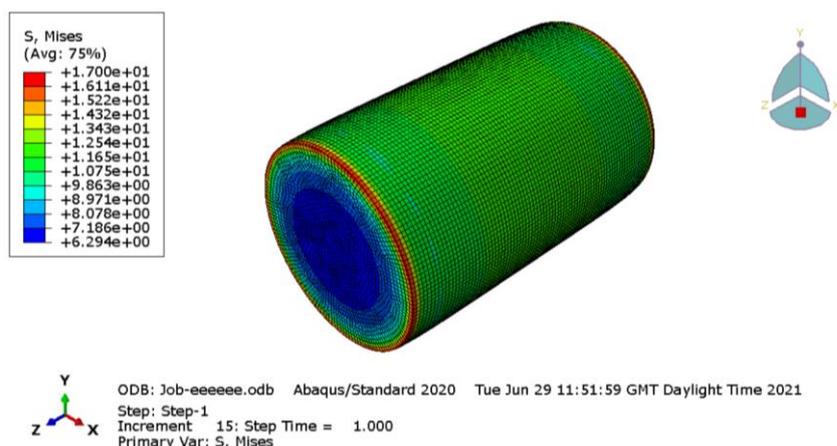


Figura 5.4 – Análise elástica da peça inicial. (Tensão de von Mises em N/mm²)

5.2.2 Otimização da Peça

Para o processo de OT, utilizou-se o Abaqus Tosca, tendo como objetivo a minimização da energia de deformação. Realizou-se testes preliminares para comprovar quais seriam as restrições geométricas mais eficazes. Nesse caso foram escolhidas a simetria rotacional, a limitação de espessura e a limitação global de volume (*vide* Tabela 5.2).

Tabela 5.2 – Parâmetros da otimização utilizados no Abaqus Tosca.

Tipo	Otimização topológica
Variáveis	SE (<i>Strain energy</i>) e V (Volume)
Objetivo	Minimizar SE
Sujeito a	Volume inferior ou igual a 3% do volume inicial.
Restrição Geométrica	Rotação simétrica com eixo de rotação 3 (ou z), com ângulo de repetição de segmento entre os 60° e 72°.
	Limitação de espessura máxima e/ou mínima da peça.

No Apêndice B encontra-se uma análise da OT para o cilindro sólido segundo quatro restrições volumétricas distintas, de 25%, 15%, 7.5% e 6% do volume inicial, todos os resultados convergiram com menos de 100 ciclos. Para melhor percepção da influência de outras restrições realizou-se um estudo adicional, como o indicado no Apêndice C e D. Introduzindo as restrições de simetria rotacional em adição à restrição de volume de 6% e 7.5% do volume inicial, bem como a adição da limitação de espessura mínima. Após concluir a análise das diversas variantes

da otimização, escolheu-se a solução que possui 3% do volume inicial, como ilustrado na Figura 5.5. Para essa otimização verifica-se que a limitação de espessura conduz a resultados indesejados. Desta forma realizou-se uma variação da simetria rotacional, sendo escolhida a solução que possui um ângulo de rotação de 72° devido, sobretudo, à sua coesão estrutural. Resultando em uma peça com apenas um arco central e 5 “pernas”. A peça escolhida possui uma redução de 15% da massa em relação ao CHS.

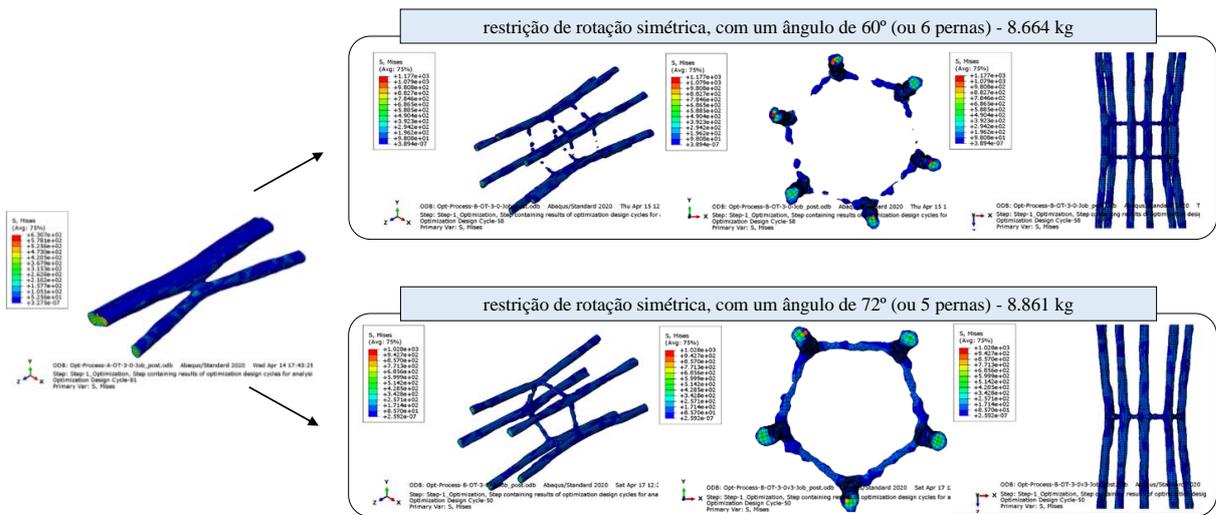


Figura 5.5 – Peça otimizada a 3% do volume inicial.

O processo de convergência é apresentado na Figura 5.6, onde foram necessários 50 ciclos para obter a convergência da peça com uma duração de dez horas para completar o processo de OT, tendo assim uma média de 5 ciclos por hora. Dependendo do conjunto de restrições utilizadas, o tempo de processamento variou entre 8 horas e 17 horas.

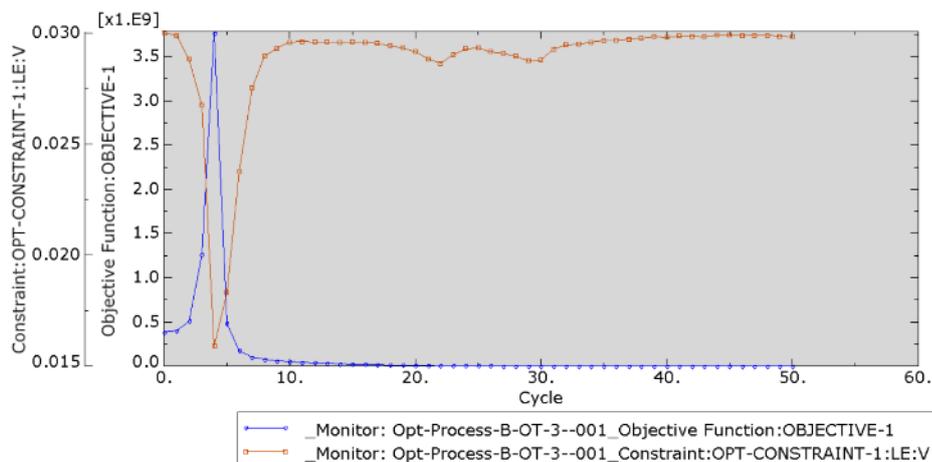


Figura 5.6 – Convergência da peça otimizada a 3% do volume inicial.

5.2.3 Engenharia Reversa e Slicing

Com a peça otimizada (*vide* Figura 5.5) realiza-se um processo de engenharia reversa, onde o objetivo é obter um desenho da peça mais uniforme. A partir do resultado da OT (Abaqus) exporta-se um arquivo num formato STL para o Inventor, sem promover nenhum tipo de *smooth* da superfície da peça, onde será feita a transição da malha exportada para um sólido. Do sólido é que será realizada a engenharia reversa no próprio Inventor (Figura 5.7).

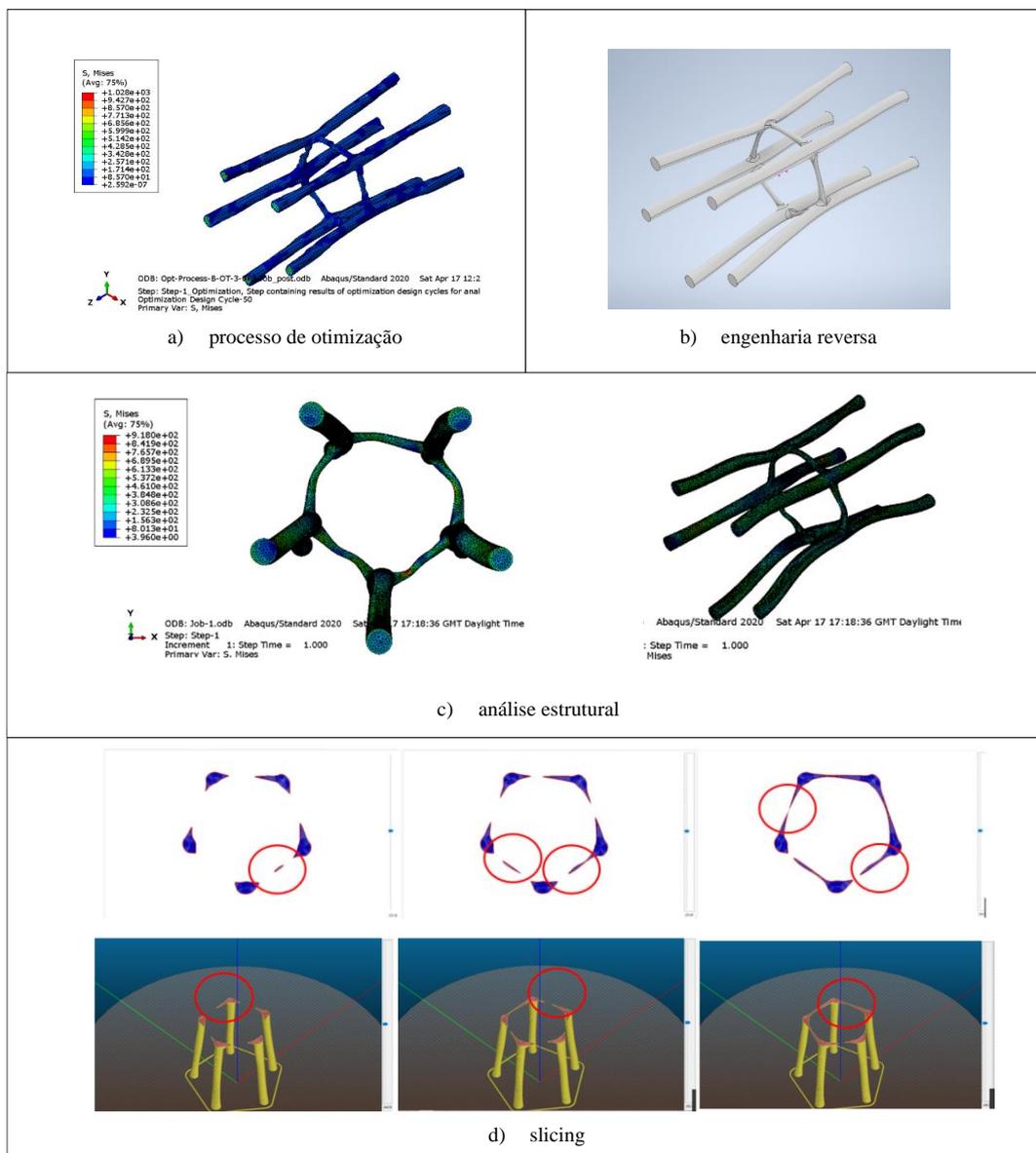


Figura 5.7 – Engenharia reversa da PP0 - A.

Na Tabela 5.3 encontram-se detalhadas todas as variações da engenharia reversa realizadas. No Apêndice E encontram-se ilustradas as peças descritas na presente tabela. A estratégia utilizada foi realizar um desenho o mais próximo da otimização obtida. Sendo esse submetido posteriormente a uma análise estrutural de validação e ao *Slicing*. A partir do qual se estudou as fragilidades da engenharia reversa resultante e se elaboraram novas estratégias de redesenho.

Tabela 5.3 – Definição das peças realizadas e das análises efetuadas na engenharia reversa, com indicação da variação mássica entre as peças.

Categoria	Característica	Sub-categoria	Característica	Inventor	Análise Abaqus				Massa (kg)	Amássica
					LA	LBA	MNA	GMNA		
PP0	Peça original obtida da OT, para a minização de volume a 3% do cilindro sólido. Para a carga de projeto.	A	Engenharia reversa feita com média precisão (com mais de 8 planos de trabalho)	X	X				9.33	-11.1%
		B	Engenharia reversa feita com baixa precisão. (com menos de 8 planos de trabalho)	X						
PP1		A	Peça PP0-A com adição de reforço no meio da peça.	X	X	X	X	X	10.72	2.1%
		B	Peça PP0-B com adição de reforço no meio da peça.	X						
PP2		C	Peça PP1-B com adição de reforço na base e no topo. Com um diâmetro máximo de 30 mm, com duas seções um círculo e uma elipse (da perna).	X	X	X	X	X	18.91	80.1%
		D	Peça PP1-B com adição de reforço na base e no topo. Com um diâmetro máximo de 20 mm, com uma seção das pernas em elipse.	X	X	X	X	X	9.23	-12.1%
		E	Modificação na peça PP2-D, com mais massa nas pernas. Com uma aproximação de círculos (com diâmetro de 24 mm). Apenas com o reforço no meio.	X	X	X	X	X	10.54	0.4%
		F	Idem a peça anterior, mas com o círculo com um diâmetro de 26 mm.	X	X	X	X	X	12.04	14.7%
		G	É a peça PP2-F com o reforço no topo e na base.	X	X	X	X	X	14.98	42.7%
		H	Uma variante da PP2-F. Mas com as pernas com 24 mm de diâmetro, com reforços no meio, no topo e na base, segundo validação do slicing.	X	X	X	X	X	12.34	17.5%
CHS	CHS obtido no processo de dimensionamento segundo o EC3. CHS139.7 x 6.			X	X	X	X	X	10.50	0.0%

Na Figura 5.7 é exposto o processo realizado para a peça PP0 – A. As “pernas” da peça foram aproximadas com planos de trabalho em XY, em um processo não rigoroso. Onde se realizou esboços aproximados de círculos em 10 planos distintos, e desses uma transição em conjunto no Inventor. Da análise estrutural concluiu-se a necessidade de reforçar o círculo central e as “pernas”, devido ao acúmulo de tensão gerado ao mudar de uma secção maior para uma menor ou vice-versa. Ao analisar o processo de impressão e o *slicing*, confirma-se a necessidade da adição de reforços junto ao núcleo central, pois o círculo central não possui substrato para proceder a impressão devido a sua inclinação horizontal, ocorrendo dessa forma uma impressão no “ar”.

Utilizou-se o *software* Slic3r para a realização do *Slicing*. Na Tabela 5.4 encontra-se detalhado os parâmetros utilizados. Após concluir o ciclo de avaliação do *slicing* e da validação estrutural é que as peças PP1 e PP2 foram refeitas, para solucionar os problemas encontrados na PP0-A. Ao idealizar os reforços mais massa é adicionada e o processo de otimização não é o mais eficiente, entretanto a necessidade de ter reforços foi comprovada.

Tabela 5.4 – Parâmetros do *slicing* para a produção das paredes da peça.

Camadas e Perímetros	Altura da camada 3 mm.
	Altura da primeira camada 3 mm.
	Usando <i>slicing</i> adaptável e superfícies horizontais correspondentes.
	Perímetros de paredes verticais, mínimo de 1 mm.
Infill	Retrair apenas ao cruzar perímetros.
Skirt	Mínimo comprimento de extrusão 0 mm.
Brim	Largura <i>brim</i> , externa e interna 0 mm.
	Largura <i>brim</i> , conexões 0 mm.
Velocidade	Velocidade para movimentos de impressão 60 mm/s.
	Velocidade para movimentos não impressos 100 mm/s.
	Velocidade da primeira camada 30 mm/s.
	Velocidade volumétrica máxima 1500 mm ³ /s.
Extrusoras múltiplas	Extrusora de perímetro.
Outros	Sem material de suporte.

5.2.4 Análise Estrutural de Validação

Para maior percepção do comportamento estrutural realiza-se quatro análises diferentes, tanto para o CHS, como para as peças obtidas pela engenharia reversa. Na Tabela 5.5 encontram-se os parâmetros utilizados na modelação estrutural das peças, realizados no Abaqus, para cada tipo de análise realizada, tal como os objetivos que levaram a realização das mesmas. As propriedades mecânicas do material real foram obtidas em Tarus (2020). Com base nas análises efetuadas foi possível definir e redefinir as estratégias da engenharia reversa.

Tabela 5.5 – Análises e respetivos parâmetros utilizados na validação estrutural das peças obtidas na engenharia reversa.

Linear Elastic Analysis (LA)	<p><u>Propriedades do material:</u> Análise do comportamento linear do aço, com $E = 197330 \text{ N/mm}^2$ e $\nu = 0.25$.</p> <p><u>Step:</u> <i>Static General</i> NI geom = off Time = 1 Incremento máximo = 1 Incremento mínimo = 1E-05 Incremento inicial = 1</p> <p><u>Interação:</u> Criou-se dois pontos de referência, RP1 (0,0,0) e RP2 (0, 0, 500), a estes dois pontos associou-se uma interação do tipo <i>coupling</i> (do género cinemático), com os 6 DOF fixos, em ambos os pontos.</p> <p><u>Condição de fronteira:</u> As condições de fronteira aplicadas são do tipo deslocamento/rotação. Em RP1 foi aplicado 5 DOF fixos e um livre, o grau livre foi o U3, referente ao deslocamento ao longo do eixo z. Em RP2 todos os DOF são fixos.</p> <p><u>Carga:</u> Aplica-se a carga de projeto, 742600 N.</p> <p><u>Malha:</u> A malha tem 5 mm de espessura, formato do elemento é o Tet.</p> <p><u>Objetivo:</u> O objetivo da análise LA é analisar o comportamento elástico linear da peça, sendo possível obter a rigidez da peça em regime elástico.</p>
Linear Bifurcation Analysis (LBA)	<p><u>Propriedades do material, interação, condição de fronteira e malha:</u> Idem a LA.</p> <p><u>Step:</u> <i>Linear perturbation - Buckle</i></p> <p><u>Carga:</u> Aplica-se uma carga unitária de 1 N.</p> <p><u>Keyword:</u> Modificação da <i>keyword</i> do modelo. No fim da <i>keyword</i> adiciona-se:</p> <p>*Node File U,</p> <p><u>Objetivo:</u> O objetivo desta análise é a obtenção da carga crítica e a obtenção do primeiro modo de deformação. Ao aplicar uma carga unitária de 1 N, obtém-se o <i>eigenvalue</i>. Este valor ao multiplicar por 1 N, obtém a carga crítica.</p>
Material non-linear Analysis (MNA)	<p><u>Propriedades do material:</u> Muda-se o material para um material com comportamento plástico, com $E = 197330 \text{ N/mm}^2$, $\nu = 0.25$, $f_y = 420 \text{ N/mm}^2$, $f_u = 545 \text{ N/mm}^2$ e $\epsilon_u = 0.16$.</p> <p><u>Step:</u> <i>Static-riks</i></p>

Nl geom off
Time = 0
 Incremento máximo = 0.1
 Incremento mínimo = 1E-05
 Incremento inicial = 0.01
 Número de incrementos = 400
Arc length = 1

Interação, condição de fronteira e malha:
 Idem a LA.

Carga:
 Aplica-se a carga crítica obtida em LBA.

Keyword:
 Sem modificação. Mantém a formatação automática.

Objetivo:
 O objetivo é a verificação do comportamento plástico sem a introdução da imperfeição.

*Geometrically and Materially
 non-linear Elastic Analysis
 with Imperfections (GMNIA)*

Propriedades do material e carga:
 Idem a MNA.

Step:
Static-general
Nl geom on
Time = 1
 Incremento máximo = 1E-06
 Incremento mínimo = 1E-10
 Incremento inicial = 0.01
 Número de incrementos = 400

Interação, condição de fronteira e malha:
 Idem a LA.

Keyword:
 Introdução da imperfeição, L/250, como possui 500 mm de altura a imperfeição local utilizada é 2. Após a propriedade do material na *keyword* introduz:

```
*IMPERFECTION, FILE=Job-LBA, STEP=1
1,2.0
**
```

Objetivo:
 O objetivo é a analisar o comportamento da peça sujeita a um material de comportamento plástico com imperfeição.

5.3 Análise Experimental

5.3.1 Impressão

Testes preliminares para melhorar a caracterização das máquinas, do material e do sistema de soldadura foram realizados antes da produção da peça em si. Com o objetivo de caracterizar os parâmetros de impressão como a velocidade de deposição, a correção do arco, a rotina de trabalho dos robôs e qual tipo de CMT seria ideal para a peça. Desses testes adotou-se uma velocidade de impressão de 10 mm/s e uma taxa de deposição de material de 6 m/min, com um tempo entre camadas de 3 segundos e com a altura teórica das camadas a variar entre os 2.9 e

3.0 mm. A mistura de gases de proteção utilizada foi composta por 2% de CO₂ e 98% de Árgon. O aço utilizado na impressão foi o aço M/SG 2²³, de 1 mm de diâmetro, com uma tensão de cedência de 420 MPa e uma tensão última de 520 MPa.

As peças obtidas pela OT e pela engenharia reversa, foram adequadas para o objetivo de obter soluções otimizadas de geometria complexa, grande mais-valia do FA. No entanto, por limitações técnicas de operação do mecanismo de impressão foi necessário proceder à impressão de peças mais simples, de forma a validar e refinar os parâmetros de impressão. Para tal, realizou-se a impressão de uma peça em CHS com 21 cm de altura com o objetivo de avaliar as propriedades do material e as imperfeições, como ilustrado na Figura 5.8.

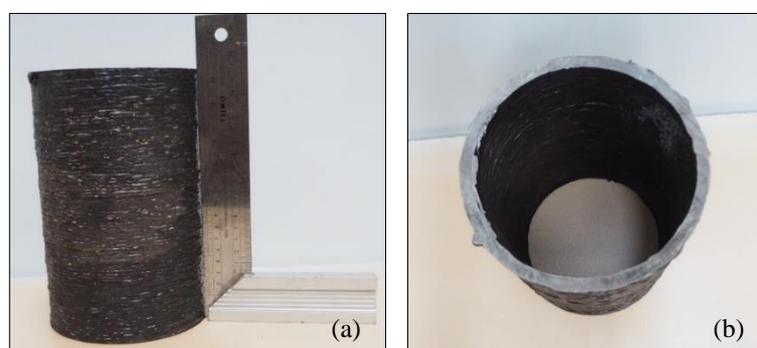


Figura 5.8 – CHS impresso, peça com 21 cm.
(a) Visão lateral e (b) Vista superior.

Na Tabela 5.6 são indicados valores médios obtidos na impressão em comparação com as dimensões dos valores teóricos, para o CHS 139.7x6 mm para a peça com 210 mm. Salienta-se que por limitações técnicas alguns dos parâmetros de impressão não são os mais adequados, tendo este estudo um contributo importante na obtenção de dados e calibração do equipamento.

Tabela 5.6 – Comparação da peça impressa com o CHS 139.7 x 6 mm.

Valores Médios	Medidas da Peça	Erro Relativo (%)
diâmetro externo (mm)	140.82	0.8
diâmetro interno (mm)	122.32	4.2
espessura topo (mm)	8.012	33.5
espessura base (mm)	9.208	53.5
massa (kg)	4.960	19.4
espessura a partir da massa global (mm)	7.23	20.5

²³ Segundo a nomenclatura da EuroTrod-Welding Consumables.

5.3.2 Ensaio Destrutivo

A peça impressa foi ensaiada à compressão simples por uma máquina hidráulica de compressão da Walter Bai, como ilustrado na Figura 5.9 (a). A sua deformação foi condicionada pela espessura da peça, sendo a espessura média na base superior à espessura média no topo. De forma que existe assim um acúmulo de tensão na parte superior que leva o início da deformação plástica nesta região, como observado na Figura 5.9 (b), sendo condicionada por encurvadura local. A peça impressa não sofreu nenhum pós-tratamento, ou outro tratamento qualquer de forma a ajudar a controlar as imperfeições, bem como não foi feito nenhum tipo de limpeza da peça antes do ensaio. O ensaio foi realizado impondo um deslocamento constante na peça de 0.2 mm/min.

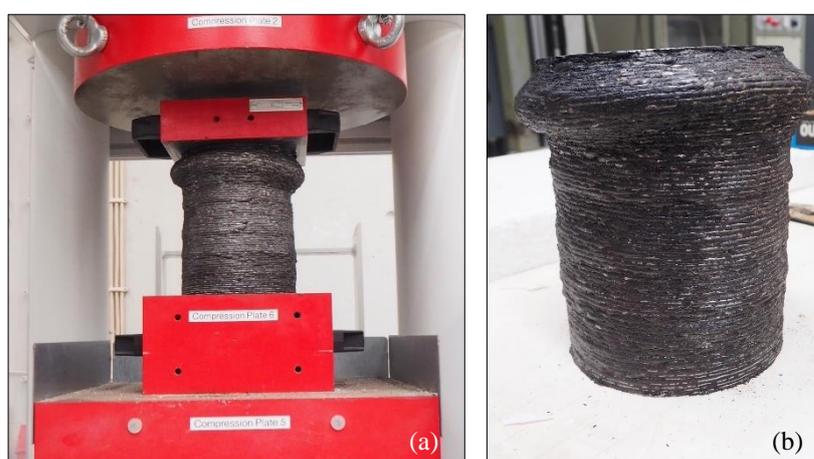


Figura 5.9 – Peça ensaiada à compressão.
(a) Ensaio a compressão e (b) Peça após ensaio.

5.4 Resultados e Discussão

As peças PP1 e PP2, obtidas pela engenharia reversa, foram concebidas para solucionar os problemas destacados na análise estrutural da peça PP0. Na Figura 5.10 encontra-se a análise estrutural feita com um modelo numérico no Abaqus de forma a verificar o comportamento das peças obtidas pela engenharia reversa, assumindo um comportamento plástico sem imperfeição, uma análise MNA. Dessa análise se observa que as peças PP2-G e PP2-F obtêm um comportamento estrutural muito próximo ao CHS, possuindo um comportamento ligeiramente mais rígido. Enquanto a peça PP2-D fica aquém do esperado. Se por um lado a PP2-G apresenta uma resistência residual superior ao da PP2-F, por outro a PP2-F possui uma massa global inferior, 12.04 kg contra 14.98 kg da PP2-G. A peça PP2-F possui menor massa pois não possui reforço na base e no topo, sendo a melhor solução entre as apresentadas, quando se analisa apenas o comportamento plástico.

Para peças obtidas por FA não existe uma forma teórica de obter as imperfeições. Assim, de forma aproximada usou-se uma análise GMNIA, a qual considera comportamento plástico com imperfeições, sendo estas imperfeições determinadas pelo EC3. Na Figura 5.11 encontra-se ilustrado os resultados obtidos ao introduzir imperfeição local na peça, conclui-se que à capacidade resistente global das peças PP2-F e PP2-G diminuiu. É previsível os valores reais das imperfeições sejam superiores aos estimados, de sorte a se comparar com o CHS os resultados possuem desvios, conquanto, para a carga de projeto ambas as peças se encontram em fase elástica.

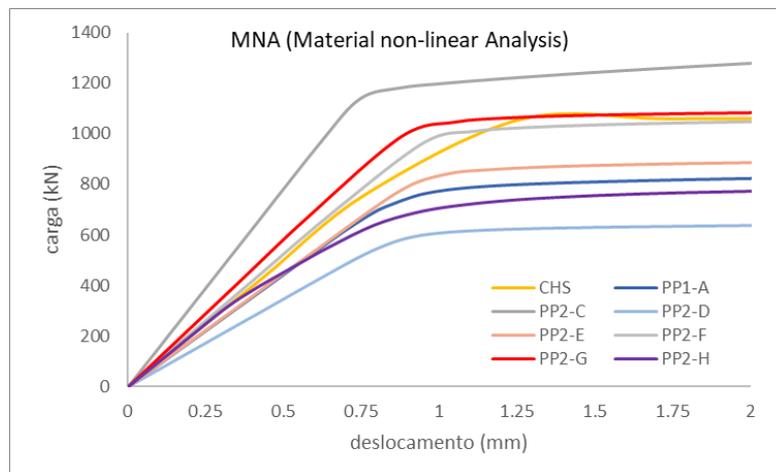


Figura 5.10 – Análise materialmente não linear.

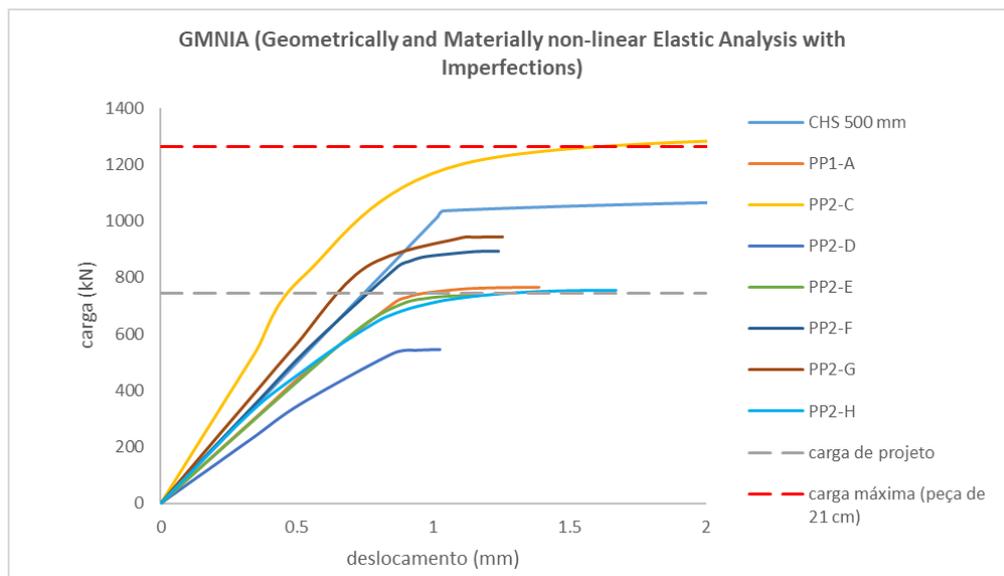


Figura 5.11 – Análise materialmente não linear com imperfeição.

Ao analisar os resultados da peça impressa (Figura 5.12) obtém-se uma carga máxima de 1262.40 kN, para a carga de projeto a peça encontra-se em fase elástica. Esta carga máxima está inclusive representada na Figura 5.11. É uma carga superior aos valores numéricos analisados. Isso deve-se a espessura real da peça impressa (valor médio estimado de 7.23 mm) ser superior ao valor teórico esperado (6 mm), para além das propriedades mecânicas reais que não estão caracterizadas.

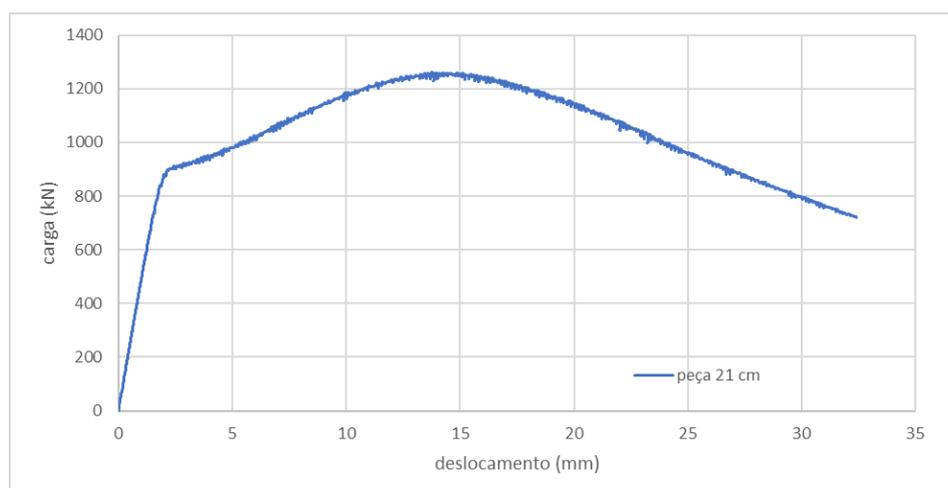


Figura 5.12 – Curva carga-deslocamento da peça impressa.

O processo de impressão realizado não possui grande acurácia, fato esse que é possível comprovar com os erros relativos, apresentados na Tabela 5.6. Os diâmetros possuem um erro relativo inferior a 5%, mas as espessuras possuem um erro superior a 33% na espessura do topo e superior a 53% na espessura da base, uma taxa de erro muito elevada. O erro recorre da estratégia de impressão utilizada. Para a obtenção da espessura de 6 mm, foi utilizada uma impressão composta por duas paredes e depois o preenchimento da parte interior. O que acarretou em uma espessura real superior ao valor teórico, já era esperado que a espessura da base seria superior a espessura do topo, uma vez que, devido a gravidade tente-se a um maior acúmulo nesta região.

Desta forma como estudado em Laghi et al. (2020), é preciso em trabalhos futuros estudar relação entre a área real, efetiva e nominal, a utilizar técnicas de medição a *laser*. Zhang et al. (2021) analisaram peças em compressão para CHS submetidos a compressão para aço inoxidável, um aço com melhores características mecânicas que o usado na impressão do CHS 139.7 x 6 mm, como ilustrado em Figura 5.13, os provetes de CHS com diâmetro de 75 mm foram produzidos por PBF. Apesar do método e do material serem distintos o módulo de elasticidade é próximo.

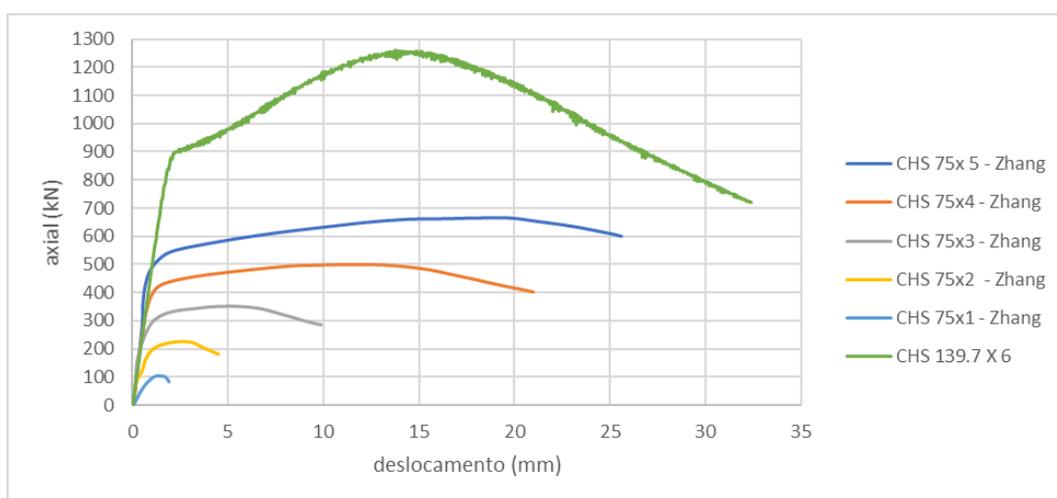


Figura 5.13 – Ensaio à compressão, CHS 75 impressos por PBF e CHS 139.7 impresso por DED-WAAM.

Na Tabela 5.7, encontra-se uma análise comparativa da resistência real das peças, em comparação com o dimensionamento realizado pelo EC3, com materiais diferentes, e processos de fabrico diferentes, os estudos detalhados podem ser encontrados em Zhang et al. (2021). Quanto mais distante de um for a relação $N_{u, test} / N_{u, EC3}$, mais ou menos conservativa será, para valores superiores a um, apresenta-se uma solução conservativa.

Tabela 5.7 – Comparação de ensaios experimentais, submetido a ensaios de compressão, para secções CHS impressas por DED e PBF.

Adaptado de: Zhang et al. (2021)

Método de Fabrico	Material	$N_{u, test} / N_{u, EC3}$	Parte do EC3
PBF	aço inoxidável	1.28	1.4
DED	aço inoxidável	1.41	1.4
convencional	aço inoxidável	1.28	1.4
DED-WAAM-CMT	aço M/SG 2	1.16	1.3

Desta forma, conclui-se que ao utilizar PBF, os valores são semelhantes ao método de construção convencional, entretanto ao utilizar DED, para o aço inoxidável, os valores são conservativos por mais de 40%. Notoriamente, é necessário realizar mais estudos e desenvolver um código regulador mais adequado, para a aplicação de DED a aço inoxidável. Já para o aço M/SG 2, a relação encontrada, com apenas um ensaio, é de 1.16, abaixo do valor convencional de 1.28, no entanto é preciso um maior número de amostras para uma melhor percepção do comportamento da peça.

6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

6.1 Conclusões

A utilização da impressão 3D na IC, encontra-se em um estado inicial. A maior parte dos trabalhos desenvolvidos utilizam betão e as suas variantes, e novos materiais. A principal aplicação do aço em construções correntes, refere-se como já destacado, à obtenção de ligações, conjugando diferentes componentes em apenas uma de geometria complexa. Esta aplicação é promissora, pois além de conjugar diferentes peças em uma, permite a otimização da eficiência estrutural, como a redução da massa global da peça.

Contanto, nos dias atuais, devido ao estado embrionário desta tecnologia, os robôs, o sistema de soldadura, a mão de obra especializada, possuem um custo elevado. Para aplicações em estruturas que possam substituir os meios convencionais, a utilização da impressão 3D para além de possuir elevado custo associado, consome mais tempo de produção que a indústria corrente de manufatura. A utilização do fabrico aditivo de elementos metálicos para a construção civil, revela-se particularmente interessante na elaboração de geometrias complexas.

O CHS com 21 cm impresso em 3D, foi produzido em um sistema de impressão que ainda carece de maior refinamento paramétrico. Os parâmetros dimensionais apresentaram desvios notórios, que na IC não podem vir a ocorrer. A imprecisão paramétrica corresponde diretamente a introdução de imperfeições e estas contribuem para uma peça final com baixa qualidade. A peça foi impressa com 21 cm por questões técnicas, devido aos desvios paramétricos apresentados, conquanto foi realizada a impressão de uma peça de 50 cm apresentada na Figura 6.1; justifica-se a realização de uma varredura a *laser* de forma a obter as espessuras reais e efetivas da peça, para melhor caracterização das imperfeições. Sendo importante realizar a caracterização mecânica do material, recorrendo-se a impressão de uma parede (*vide* Figura 6.2), com o objetivo de realizar os estudos experimentais e em conjunto realizar a modelação numérica para o refinamento da caracterização mecânica do material, assim como as possíveis aplicações e limitações construtivos deste.

A engenharia reversa não se encontra bem caracterizada e ainda não há estudos relevantes nesta temática, para peças impressas de grande porte com aplicação na IC. É importante perceber quais os parâmetros e como se deve aplicar a engenharia reversa em cenários diversos de complexidades. A forma que a engenharia reversa foi desenvolvida condiciona o comportamento estrutural da peça, podendo ser uma vantagem ou desvantagem para o FA. Na análise das peças obtidas pela engenharia reversa utilizou-se diferentes estratégias de construção, e estas conduziram a resultados distintos. A previsão da necessidade de reforços,

com funções estruturais ou apenas como função de apoio ao processo de impressão, requer especial atenção do projetista desde o momento inicial do projeto, uma vez que a conceção estrutural obtida a partir da otimização, neste caso, não foi automática.



Figura 6.1 – CHS impresso com 500 mm, por WAAM – CMT.



Figura 6.2 – Parede impressa com 480 x 300 x 6 mm, por WAAM – CMT.

Não foi vantajosa a utilização do FA em comparação com os meios convencionais para peças de geometria simples, como o caso do CHS, devido a baixa precisão obtida pelo processo quando comparado com os métodos existentes. Mais estudos com essa temática são necessários, para uma melhor caracterização dos problemas, como a análise de técnicas mais avançadas integradas ao sistema de fabrico, de forma a tornar o processo mais eficiente, como a aplicação de DT, ML, IA e IoT, na validação estrutural, manutenção e monitoramento das peças durante o seu ciclo de vida útil.

6.2 Trabalhos Futuros

O FA de elementos metálicos virá a ter maior espaço no mercado na IC, sendo necessário mais investigação nesta área, desde estudar processos, métodos, máquinas e materiais. É fulcral que os materiais sejam bem caracterizados mecanicamente e técnicas de minimização de tensões residuais sejam desenvolvidas. Destarte, destaca-se um conjunto de sugestões de trabalhos futuros:

- Analisar as ações que provocam mais imperfeições e as medidas que devem ser empregues para mitigar e/ou reduzi-las;
- Caracterizar as espessuras (nominais e efetivas) por medições a *laser*, para a peça com 500 mm;
- Caracterizar as propriedades dos materiais de impressão do sistema WAAM;

- Comparar o tempo de vida útil de peças impressas com peças feitas através de meios convencionais;
- Desenvolver um sistema DT para validação estrutural da peça impressa, sem recorrer a ensaios destrutivos;
- Desenvolver um método de análise prévia das imperfeições atribuídas a impressão de forma matemática, para peças de baixa complexidade;
- Imprimir uma das secções otimizadas, obtidas na engenharia reversa desta dissertação, e validar a resistência da mesma;
- Investigar o impacto da otimização para uma carga superior à de projeto, comparando com a otimização para a carga de projeto com a estimativa da imperfeição atribuída à peça, de forma a verificar se é mais coerente realizar o processo de otimização para uma carga de projeto ou para uma carga superior;
- Investigar o impacto de defeitos e/ou falhas construtivas, em relação a modos de deformação predominantes. Considerando defeitos e/ou falhas como: a troca do filamento a meio do processo de impressão utilizado e das botijas de gás utilizadas, bem como a interrupção de impressão de um dia para o outro;
- Realizar o ensaio destrutivo da peça com 500 mm;
- Validar a aplicação do FA a ligações metálicas, simples e mistas;
- Validar as tolerâncias de fabrico, e as suas aplicações na eficiência estrutural da peça impressa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abreu, S. A. C. (2015). “Impressão 3D baixo custo versus impressão em equipamentos de elevado custo.” Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade do Porto, Orientador: Professor Fernando Jorge Lino Alves, Porto, Vol. 1.
- Adaloudis, M., & Roca, J. B. (2021). “Sustainability tradeoffs in the adoption of 3D Concrete Printing in the construction industry”. *Journal of Cleaner Production*, Vol 307, Issue September 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127201>
- Adira (2020). “Large Metal Printer Solution.” Relatório técnico da maior impressora atual utilizando PBF para aço. Vila Nova de Gaia
- Alaloul, W. S., Liew, M. S., Zawawi, N. A. W. A., & Kennedy, I. B. (2020). “Industrial Revolution 4.0 in the construction industry: Challenges and opportunities for stakeholders”. *Ain Shams Engineering Journal*, Vol. 11, Issue 1, pp. 225–230. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2019.08.010>
- American Psychological Association (APA), (2010). “Publication manual of the American Psychological Association”. Sexta Edição, Washington (DC). ISBN: 978-1-4338-0561-5
- Arora, J. (2012). “Introduction to Optimum Design. In Introduction to Optimum Design.” Quarta Edição, Elsevier. ISBN: 978-0-12-381375-6. <https://doi.org/10.1016/C2009-0-61700-1>
- Bendsøe e Sigmund. (2012). “Topology Optimization: Theory, Methods and Applications.” Segunda Edição, Springer. ISBN: 978-3-7091-1308-0. https://doi.org/10.1007/978-3-7091-1309-7_3
- Bendsøe, M. P. (1995). “Optimization of Structural Topology, Shape, and Material.” Primeira Edição, Springer. ISBN: 978-3-662-03115-5. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-03115-5>
- Buchanan, C., & Gardner, L. (2019). “Metal 3D printing in construction: A review of methods, research, applications, opportunities and challenges”. *Engineering Structures*, Vol. 180, Issue February, pp. 332–348. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.11.045>

-
- Buchanan, C., Wan, W., & Gardner, L. (2018). "Testing of wire and arc additively manufactured stainless steel material and cross-sections." Ninth International Conference on Advances in Steel Structures (ICASS2018), Hong Kong.
- Buchanan, C., Matilainen, V. P., Salminen, A., & Gardner, L. (2017). "Structural performance of additive manufactured metallic material and cross-sections." *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 136, Issue December 2016, pp. 35–48. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2017.05.002>
- Cadiou, S., Courtois, M., Carin, M., Berckmans, W., & Le masson, P. (2020). "3D heat transfer, fluid flow and electromagnetic model for cold metal transfer wire arc additive manufacturing (Cmt-Waam)". *Additive Manufacturing*, Vol. 36, Issue June. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101541>
- Cai, S., Ma, Z., Skibniewski, M. J., & Bao, S. (2019). "Construction automation and robotics for high-rise buildings over the past decades: A comprehensive review." *Advanced Engineering Informatics*, Vol. 42, Issue August. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2019.100989>
- Cai, Y., Wang, Y., & Burnett, M. (2020). "Using augmented reality to build digital twin for reconfigurable additive manufacturing system." *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 56, Issue April, 598–604. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.04.005>
- Delgado Camacho, D., Clayton, P., O'Brien, W. J., Seepersad, C., Juenger, M., Ferron, R., & Salamone, S. (2018). "Applications of additive manufacturing in the construction industry – A forward-looking review." *Automation in Construction*, Vol. 89, Issue October 2017, 110–119. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.12.031>
- Elahi, B., & Tokaldany, S. A. (2021). "Application of Internet of Things-aided simulation and digital twin technology in smart manufacturing." In *Advances in Mathematics for Industry 4.0*, pp. 335–359. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-818906-1.00015-2>
- EOS (2019). EOS M 290 – "Produces highest quality metal parts in additive manufacturing." Manual técnico da impressora EOS M 290, Alemanha.
- Fronius (2021). "Manual de instruções. Fonte de Solda para Soldadura MIG/MAG. TPS 320i / 400i / 500i / 600i TPS 400i LSC ADV." Austria.
-

-
- Galjaard, S., Hofman, S., & Ren, S. (2015). "Optimizing Structural Building Elements in Metal by using Additive Manufacturing." Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS), 17 - 20 August 2015, Amsterdam, The Netherlands.
- Gaynor, A. T., & Guest, J. K. (2016). "Topology optimization considering overhang constraints: Eliminating sacrificial support material in additive manufacturing through design." *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Vol. 54, Issue 5, pp. 1157–1172. <https://doi.org/10.1007/s00158-016-1551-x>
- Gonçalves, F. A. (2018). "Introduction to Structural Optimization using the ESO and BESO Evolutionary Methods." Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade do Porto, Orientador: Prof. Dr. Marco Parent, Porto, Vol. 1.
- González, J., Rodríguez, I., Prado-Cerqueira, J. L., Diéguez, J. L., & Pereira, A. (2017). "Additive manufacturing with GMAW welding and CMT technology." *Procedia Manufacturing*, Vol. 13, pp. 840–847. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.09.189>
- Hossain, M. A., Zhumabekova, A., Paul, S. C., & Kim, J. R. (2020). "A review of 3D printing in construction and its impact on the labor market." *Sustainability (Switzerland)*, Vol. 12, Issue 20, pp. 1–21. <https://doi.org/10.3390/su12208492>
- ISO/ASTM (2013). "Standard terminology for additive manufacturing - Coordinate systems and test methodologies." 52921, International Organization for Standardization/American Society for Testing and Materials, USA.
- ISO/ASTM (2015). "Terminology, Additive manufacturing — General principles. Terminology, Additive Manufacturing — General Principles." 52900, International Organization for Standardization/American Society for Testing and Materials, USA.
- Jafari, D., Vaneker, T. H. J., & Gibson, I. (2021). "Wire and arc additive manufacturing: Opportunities and challenges to control the quality and accuracy of manufactured parts." *Materials and Design*, Vol. 202. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.109471>
- Karayel, E., & Bozkurt, Y. (2020). "Additive manufacturing method and different welding applications." *Journal of Materials Research and Technology*, Vol. 9, Issue 5. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.08.039>
- Kazanas, P., Deherkar, P., & Almeida, P. (2012). "Fabrication of geometrical features using wire and arc additive manufacture." Vol. 226, Issue 6, pp. 1042–1051. <https://doi.org/10.1177/0954405412437126>
-

-
- Kim, M. J., Chi, H. L., Wang, X., & Ding, L. (2015). “Automation and Robotics in Construction and Civil Engineering.” *Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications*, Vol. 79, Issue 3–4, pp. 347–350. <https://doi.org/10.1007/s10846-015-0252-9>
- Kumar, G. V. V. R., Srinivasan, P., Shastry, K. G., & Prakash, B. G. (2001). “Geometry based triangulation of multiple trimmed NURBS surfaces.” *Computer-Aided Design*, Vol. 33, pp 429-454.
- Laghi, V., Palermo, M., Gasparini, G., Girelli, V. A., & Trombetti, T. (2020). “Experimental results for structural design of Wire-and-Arc Additive Manufactured stainless steel members.” *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 167. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2019.105858>
- Lalo, D. F. (2015). “Otimização topológica evolucionária de estruturas submetidas à múltiplos casos de carregamento.” Tese de Mestrado, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Orientador: Prof. Dr. Marcelo Greco, Belo Horizonte, Vol. 1.
- Lima, L., Trindade, E., Alencar, L., Alencar, M., & Silva, L. (2021). “Sustainability in the construction industry: A systematic review of the literature.” *Journal of Cleaner Production*, Vol. 289. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125730>
- Liu, C., Le Roux, L., Körner, C., Tabaste, O., Lacan, F., & Bigot, S. (2020). “Digital Twin-enabled Collaborative Data Management for Metal Additive Manufacturing Systems.” *Journal of Manufacturing Systems*, April. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.05.010>
- Loyrette, H. (1986). “Gustave Eiffel”. Primeira edição, Payot, Paris.
- Malik, A. A., & Brem, A. (2021). “Digital twins for collaborative robots: A case study in human-robot interaction.” *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 68, Issue September. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2020.102092>
- Mam, K., Douthe, C., Le Roy, R., & Consigny, F. (2020). “Shape optimization of braced frames for tall timber buildings: Influence of semi-rigid connections on design and optimization process.” *Engineering Structures*, Vol. 216, Issue April. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110692>
- N., N. (2009).” VDI-Guideline 3404: Additive fabrication - Rapid technologies (rapid prototyping) Fundamentals, terms and definitions, quality parameter, supply agreements.” Beuth Verlag, Berlin.
-

-
- Nogueira, F. T. B. F. (2021). “A review on robotic-based additive manufacturing with emphasis on the direct energy deposition.” *Research Seminar in Advanced Production Systems 2021*.
- NP EN 1993-1-1 (2010). “Eurocódigo 3 – Projecto de estruturas de aço. Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios.” CEN - Comité Europeu de Normalização, Bruxelas.
- Paolini, A., Kollmannsberger, S., & Rank, E. (2019). “Additive manufacturing in construction: A review on processes, applications, and digital planning methods.” *Additive Manufacturing*, Vol. 30, Issue September. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100894>
- Picelli, R., Townsend, S., Brampton, C., Norato, J., & Kim, H. A. (2018). “Stress-based shape and topology optimization with the level set method.” *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, Vol. 329, pp. 1–23. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2017.09.001>
- Pires, J. N. & Tankova, T. (2020). “AMConstruction – Additive Manufacturing in Steel Construction”. Apresentação do projeto, janeiro, Coimbra.
- Prado-Cerqueira, J. L., Diéguez, J. L., & Camacho, A. M. (2017). “Preliminary development of a Wire and Arc Additive Manufacturing system (WAAM).” *Procedia Manufacturing*, Vol. 13, pp. 895–902. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.09.154>
- Quarshie R., MacLachlan S., Reeves P., Whittaker D., & Blake R. (2012). “Shaping our national competency in additive manufacturing.” *Materials KTN, Technology Strategy Board*, Vol. 27, Issue September.
- Reddy, S. N., Ferguson, I., Frecker, M., Simpson, T. W., & Dickman, C. J. (2016). “Topology optimization software for additive manufacturing: A review of current capabilities and a real-world example.” *Proceedings of the ASME Design Engineering Technical Conference*, Vol. 2A-2016, Issue August. <https://doi.org/10.1115/DETC2016-59718>
- Richardson, V. (2017). “3D printing becomes concrete: exploring the structural potential of concrete 3D printing.” *The Structural Engineer*, October.
- Selvi, S., Vishvaksenan, A., & Rajasekar, E. (2018). “Cold metal transfer (CMT) technology - An overview.” *Defence Technology*, Vol. 14, Issue 1, pp. 28–44. <https://doi.org/10.1016/j.dt.2017.08.002>
-

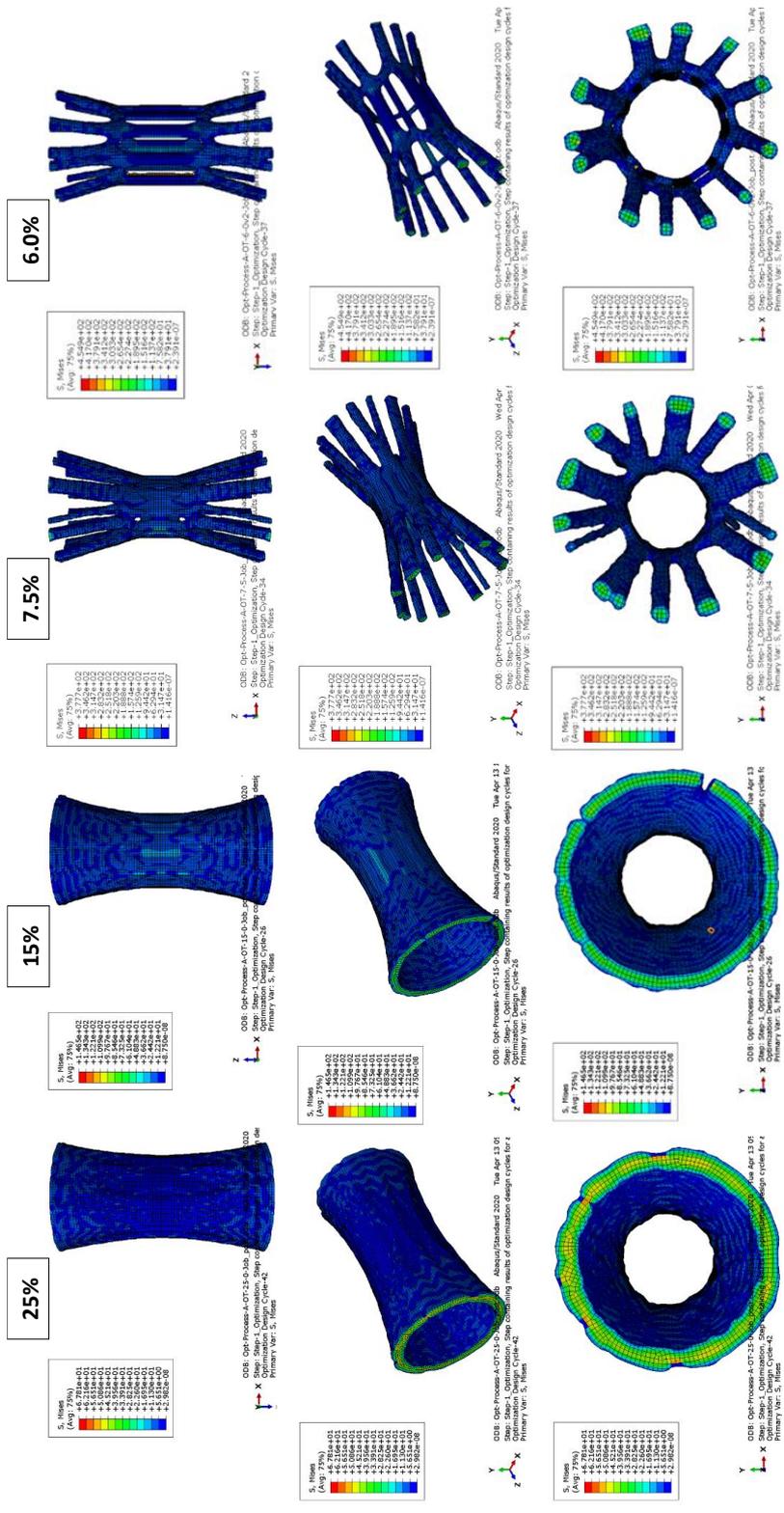
-
- Shen, H., Pan, L., & Qian, J. (2019). “Research on large-scale additive manufacturing based on multi-robot collaboration technology.” *Additive Manufacturing*, Vol. 30. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100906>
- Simões, R. (2014). “Manual de Dimensionamento de Estruturas Metálicas”. CMM - Associação Portuguesa de Construção Metálica e Mista, Terceira Edição.
- Tankova, T., & Simões da Silva, L. (2020). “Robotics and Additive Manufacturing in the Construction Industry.” *Current Robotics Reports*, Vol. 1, Issue 1, pp. 13–18. <https://doi.org/10.1007/s43154-020-00003-8>
- Tarus, I. (2020). “Evaluation of structural properties of high performance steel obtained on coupon specimens.” Tese de Mestrado, Technical University of Civil Engineering Bucharest, Bucureste, Vol.1.
- Thompson, M. K., Moroni, G., Vaneker, T., Fadel, G., Campbell, R. I., Gibson, I., Bernard, A., Schulz, J., Graf, P., Ahuja, B., & Martina, F. (2016). “Design for Additive Manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints.” *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 65, Issue 2, pp. 737–760. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.05.004>
- Urhal, P., Weightman, A., Diver, C., & Bartolo, P. (2019). “Robot assisted additive manufacturing: A review.” *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 59, Issue May, pp. 335–345. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2019.05.005>
- Vaneker, T., Bernard, A., Moroni, G., Gibson, I., & Zhang, Y. (2020). “Design for additive manufacturing: Framework and methodology.” *CIRP Annals*, Vol. 69, Issue 2, pp. 578–599. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2020.05.006>
- Vartanian, K., Brewer, L., Manley, K., & Cobbs, T. (2016). “Powder Bed Fusion vs. Directed Energy Deposition benchmark study: mid-size part with simple geometry.” https://www.optomec.com/wp-content/uploads/2018/06/PBF-vs-DED-BENCHMARK-STUDY_7March_2018-03.pdf
- Wang, C., Tan, X. P., Tor, S. B., & Lim, C. S. (2020). “Machine learning in additive manufacturing: State-of-the-art and perspectives.” *Additive Manufacturing*, Vol. 36, Issue August. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101538>
- Wang, Y., Gao, J., & Kang, Z. (2018). “Level set-based topology optimization with overhang constraint: Towards support-free additive manufacturing.” *Computer Methods in Applied*
-

- Mechanics and Engineering, Vol. 339, Issue May, pp. 591–614.
<https://doi.org/10.1016/j.cma.2018.04.040>
- Weber, B. (2020). “Material anisotropy in wire and arc additively manufactured structures.” Tese de Mestrado, Imperial College London. Orientadores: Prof. Leroy Gardner e Dr. Nicolas Hadjipanteli, Londres, Vol. 1.
- Wohlers Associates (2019). “Wohlers Report 2019 - 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry”
- World Economic Forum (WEF), (2016). “Shaping the Future of Construction A Breakthrough in Mindset and Technology.”
- World Economic Forum (WEF), (2017). “Recycling our Infrastructure for Future Generations.”
- World Economic Forum (WEF), (2019). “Transforming Infrastructure: Frameworks for Bringing the Fourth Industrial Revolution to Infrastructure.”
- World Economic Forum (WEF), (2020a). “Global Future Council on Infrastructure Six Qualities of Sustainable Infrastructure.”
- World Economic Forum (WEF), (2020b). “Mapping TradeTech: Trade in the Fourth Industrial Revolution.”
- World Economic Forum (WEF), (2020c). “The Impact of COVID-19 on the Future of Advanced Manufacturing and Production - Insights from the World Economic Forum’s Global Network of Advanced Manufacturing Hubs.” June 2020, pp.1–5.
http://www3.weforum.org/docs/WEF_AMHUB_Insight_Paper_2020.pdf
- Xia, B., Olanipekun, A., Chen, Q., Xie, L., & Liu, Y. (2018). “Conceptualising the state of the art of corporate social responsibility (CSR) in the construction industry and its nexus to sustainable development.” *Journal of Cleaner Production*, Vol. 195, pp. 340–353.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.157>
- Yadollahi, A., & Shamsaei, N. (2017). “Additive manufacturing of fatigue resistant materials: Challenges and opportunities.” *International Journal of Fatigue*, Vol. 98, pp. 14–31.
<https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2017.01.001>
- Yan, J. J., Chen, M. T., Quach, W. M., Yan, M., & Young, B. (2019). “Mechanical properties and cross-sectional behavior of additively manufactured high strength steel tubular

- sections.” *Thin-Walled Structures*, Vol. 144, Issue April, pp. 106-158. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2019.04.050>
- Zhang, B., Goel, A., Ghalsasi, O., & Anand, S. (2019). “CAD-based design and pre-processing tools for additive manufacturing.” *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 52, Issue November 2018, pp. 227–241. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2019.03.005>
- Zhang, R., Gardner, L., Buchanan, C., Matilainen, V. P., Piili, H., & Salminen, A. (2021). “Testing and analysis of additively manufactured stainless steel CHS in compression.” *Thin-Walled Structures*, Vol. 159, Issue October 2020. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.107270>
- Zhou, C., Wang, H., Perry, T. A., & Schroth, J. G. (2017). “On the Analysis of Metal Droplets During Cold Metal Transfer.” *Procedia Manufacturing*, Vol. 10, pp. 694–707. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.024>
- 3dprinting@ (2021). <https://3dprinting.com/software/>. Software For 3D Printing. Amsterdam. Acedido em 14/05/2021.
- AI SpaceFactory@ (2021). <https://www.aispacefactory.com/>. (página oficial). Estados Unidos da América. Acedido em 01/06/2021.
- All3DP@ (2016). <https://all3dp.com/uae-aim-3d-printing-global-hub-2030/>. 25% of Dubai’s Buildings Will Be 3D Printed by 2030. München. Acedido em 07/05/2021.
- All3DP@ (2021). <https://all3dp.com/2/2019-best-companies-building-3d-printed-houses/>. 7 Biggest Companies Building 3D Printed Houses. München. Acedido em 06/05/2021.
- Archdaily@ (2021). <https://www.archdaily.com/tag/ai-spacefactory>. Ai Space Factory: The Latest Architecture and News. Acedido em 05/05/2021.
- Dassault Systèmes@ (2018). <https://make.3dexperience.3ds.com/processes/3D-printing>. Introduction to 3D printing - additive processes. Acedido em 10/05/2021.
- ICON Technology@ (2021). <https://www.iconbuild.com/>. (página oficial). Estados Unidos da América. Acedido em 01/06/2021.
- Katerra@ (2021). <https://katerra.com/>. (página oficial). Estados Unidos da América. Acedido em 01/06/2021.

- M2DO@ (2021a). <http://m2do.ucsd.edu/research/?topic=largescale>. Large-Scale Topology Optimization. Multiscale Multiphysics Design Optimization Laboratory. Cardiff. Acedido em 18/05/2021.
- M2DO@ (2021b). <http://m2do.ucsd.edu/research/?topic=stress>. Stress-Constrained Topology Optimization. Multiscale Multiphysics Design Optimization Laboratory. Cardiff. Acedido em 18/05/2021.
- MX3D@ (2021). <https://mx3d.com/industries/construction/>. Structural Steel Connector. Amsterdam. Acedido em 07/05/2021.
- The Guardian@ (2021a). <https://www.theguardian.com/us-news/2021/mar/09/us-climate-crisis-cut-emissions-environment>. US climate crisis cut emissions environment. Reino Unido. Acedido em 10/04/2021.
- The Guardian@ (2021b). <https://www.theguardian.com/global-development/2021/feb/23/revealed-migrant-worker-deaths-qatar-fifa-world-cup-2022>. Revealed: 6,500 migrant workers have died in Qatar since World Cup awarded. Reino Unido. Acedido em 11/05/2021.

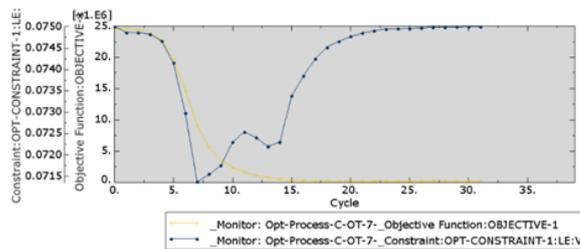
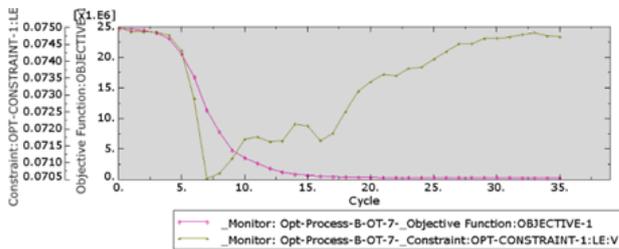
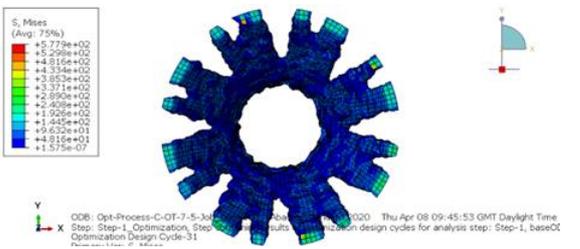
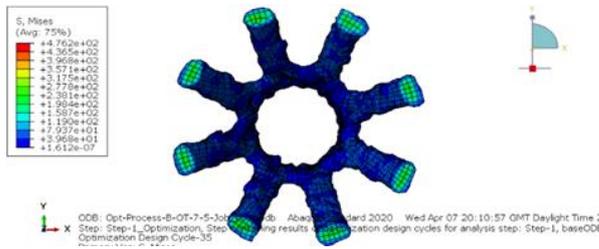
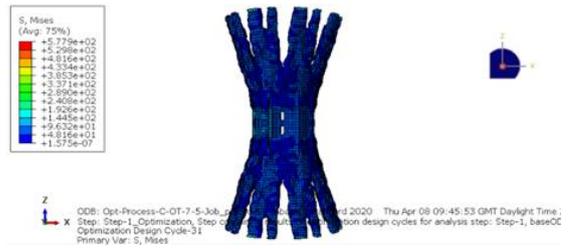
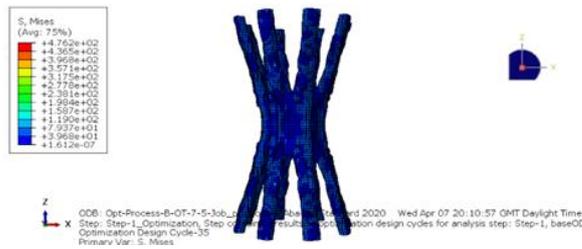
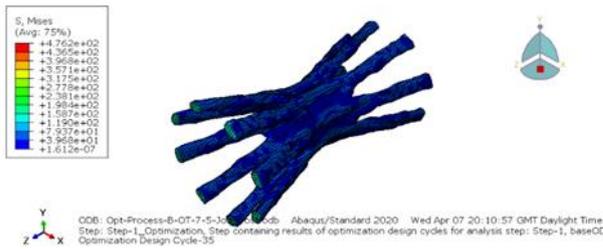
APÊNDICE B – OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA



APÊNDICE D – OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA PARA 7.5% COM RESTRIÇÃO

Com restrição de simetria rotacional com um ângulo de 45°

Com restrição de simetria rotacional com um ângulo de 45° e restrição de espessura mínima de 3 mm



APÊNDICE E – ENGENHARIA REVERSA

