CIÊNCIA & TECNOLOGIA DOS MATERIAIS

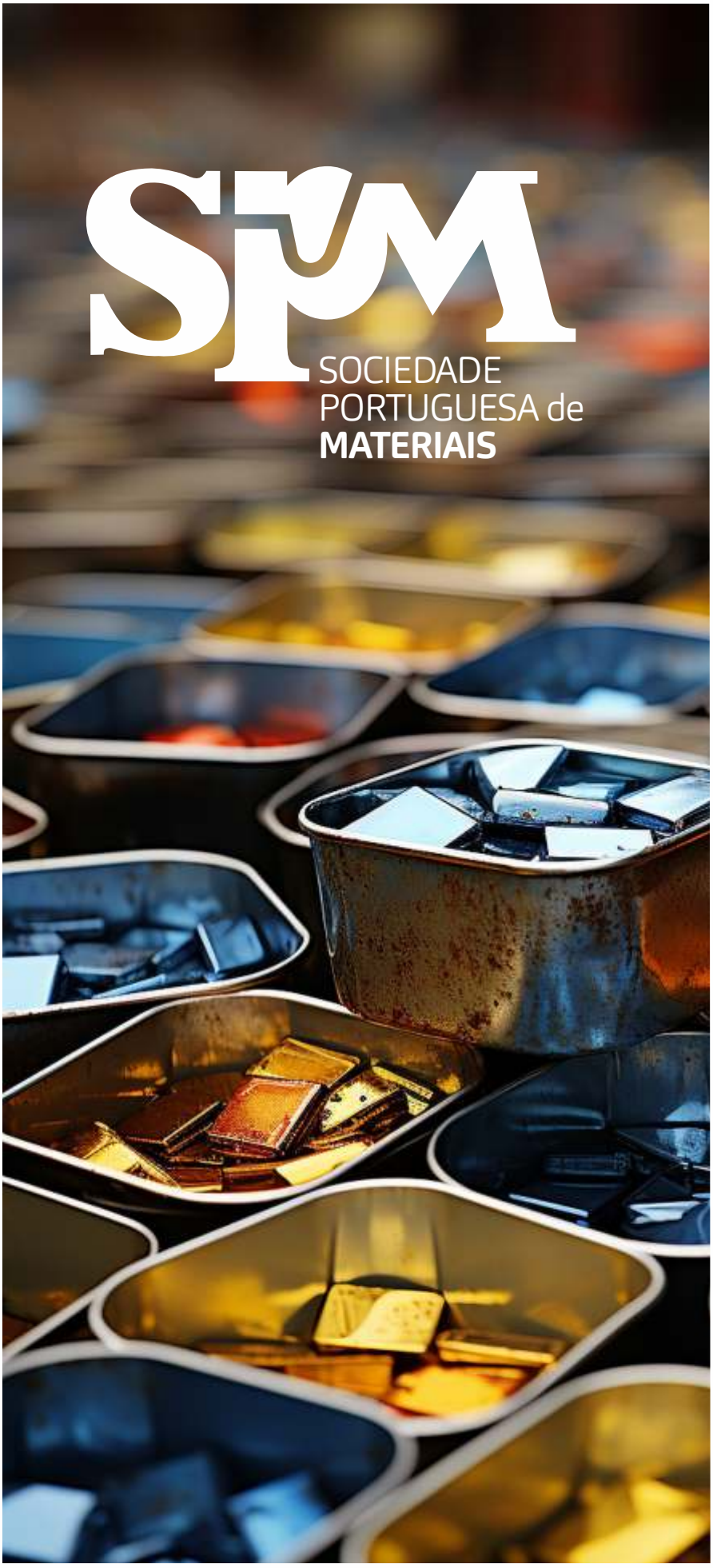
REVISTA DA SOCIEDADE PORTUGUESA DE MATERIAIS | **2024** | **VOL.36** | **Nº1**



FABRICO ADITIVO

PRESENTE E FUTURO

SPM
SOCIEDADE PORTUGUESA de MATERIAIS



FICHA TÉCNICA

DIRETOR
Jorge Lino

DIRETOR ADJUNTO
Vitor Francisco

CONSELHO EDITORIAL
Manuela Oliveira
Joana Sousa

EDITORES CONVIDADOS
Abílio de Jesus (DEMec, FEUP)
Hélder Puga (DEM, UMinho)
Pedro Rosa (DEM, IST-UL)
(DT de Tecnologia e Processamento de Materiais*)*

PROPRIEDADE E REDACÇÃO
Sociedade Portuguesa de Materiais

PAGINAÇÃO
Lemos design

Sociedade Portuguesa de Materiais Apartado 4538 EC Carnide 1511-970 Lisboa

A SOCIEDADE PORTUGUESA DE MATERIAIS

É MEMBRO DA...

EUROPEAN FEDERATION OF CORROSION (EFC)

IMPORTANTES BENEFÍCIOS DISPONÍVEIS PARA AS SOCIEDADES MEMBROS DA EFC (EUROPEIAS E INTERNACIONAIS) INCLUEM A OPORTUNIDADE DE:

- Nomear membros para os grupos de trabalho do EFC;
- Nomear candidatos para os comitês do EFC (Conselho de Administradores e Comité Consultivo de Ciência e Tecnologia);
- Nomear um representante para a Assembleia Geral anual do EFC (com direitos de voto);
- Nomear candidatos para os prémios da EFC;
- Organizar eventos e cursos com patrocínio e logotipo do EFC; com promoção especial no "Calendário de Eventos"do EFC, publicado no website da EFC e nas newsletters EFC;
- Obter descontos em conferências anuais da EUROCORR se desejar participar como expositor;
- Promoção gratuita dos eventos e atividades relacionados com a Divisão Técnica de Corrosão da SPM nos boletins da EFC;
- Disponibilidade de Afiliação Geral da Organização Mundial da Corrosão (WCO) sem custo adicional sujeito a solicitação formal e aprovação do Conselho de Administradores da WCO e da Assembleia Geral da WCO;
- Além disso, todos os que pertencem a uma Sociedade Membro do EFC usufruem de uma redução na inscrição em conferências anuais da EUROCORR; redução do registro em todos os eventos patrocinados pela EFC, se aplicável (com número de evento atribuído); acesso à área restrita contendo os procedimentos eletrônicos das conferências anteriores da EUROCORR; preços com desconto em todas as publicações da EFC;
- Sociedades membros europeias também são elegíveis para apresentar propostas de organização de conferências EUROCORR.

FEDERATION OF EUROPEAN MATERIALS SOCIETIES (FEMS)

IMPORTANTES BENEFÍCIOS DISPONÍVEIS PARA OS SÓCIOS DA SPM:

- Redução da Inscrição na conferência EUROMAT (15%);
- Uma voz mais forte na Europa como parte de uma organização de grande escala e que aglomera grandes sociedades europeias
- Divulgação dos eventos e atividades da sociedades da SPM;
- Capacidade de contribuir para a agenda europeia de materiais;
- Envolvimento direto em eventos organizados pela FEMS;
- Nas conferências da EUROMAT, os membros das sociedades nacionais serão identificados nos seus crachás como membros da sua sociedade - oportunidade para uma rede mais extensa entre os seus membros;
- Nomear membros para prémios FEMS e medalhas;
- A FEMS desenvolveu valiosas ligações à Comissão Europeia e a importantes Plataformas Tecnológicas Europeias, sendo membro da Alliance for Materials (A4M).

A SPM É TAMBÊM MEMBRO DA...

EUROPEAN POLYMER FEDERATION (EPF)

VISÃO INDUSTRIAL

07 3DCP COMO RESPOSTA ÀS CRISES DE MÃO-DE-OBRA, DE HABITAÇÃO E CLIMÁTICA

11 IMPRESSÃO 3D ULTRA-RÁPIDA DA NORCAM - 3DZ NOS COMBOIOS DE ALTA VELOCIDADE DA ALSTOM

14 IMPRESSÃO 3D DE BAIXO CUSTO E ACABAMENTOS SUPERFICIAIS

18 JOÃO DE DEUS E FILHOS - UM PERCURSO PELA IMPRESSÃO 3D

OPINIÃO DE...

22 FABRICO ADITIVO: DESAFIOS E O FUTURO DA PRODUÇÃO

INOVAÇÃO INDUSTRIAL

24 CONTRAMOLDE DE TABLIER DE AUTOMÓVEL PRODUZIDO POR FABRICO ADITIVO

28 O FABRICO HÍBRIDO COMO POTENCIADOR DE EFICIÊNCIA E INOVAÇÃO EM FERRAMENTAS DE CORTE PARA A INDÚSTRIA AUTOMÓVEL

35 FABRICO ADITIVO POR EXTRUSÃO: ESTIMATIVA DA RIGIDEZ DE UM EQUIPAMENTO CUSTOMIZADO COM CABEÇOTE MONOROSCA

45 INOVAÇÃO EM FABRICO ADITIVO

51 ADOÇÃO DE FABRICO ADITIVO EM CADEIAS DE ABASTECIMENTO DA INDÚSTRIA DE PROCESSO: FATORES DE SUCESSO E PERSPETIVA FUTURA

ENTREVISTA

57 COM FILIPPO BERTO

INVESTIGAÇÃO

59 DESENVOLVIMENTO DE NOVOS SCAFFOLDS MULTIMATERIAL PARA RECONSTRUÇÃO MANDIBULAR

69 3D PRINTING CENTER FOR HEALTH: INOVAÇÃO EM SAÚDE

75 FABRICO ADITIVO DE ALIMENTOS: INFLUÊNCIA DA VISCOELASTICIDADE NA IMPRESSÃO 3D DE ALIMENTOS

83 PRODUÇÃO E AVALIAÇÃO DA RUGOSIDADE SUPERFICIAL DE INSERTOS MOLDANTES POLIMÉRICOS PARA A MOLDAÇÃO POR INJEÇÃO DE LOGOTIPOS AUTOMÓVEIS

91 FABRICO ADITIVO POR EXTRUSÃO DE FILAMENTO METÁLICO NO IST: ENSINO E INVESTIGAÇÃO

99 DESENVOLVIMENTO E INVESTIGAÇÃO EM MATERIAIS E FABRICO AVANÇADO NA UNIVERSIDADE DE MACAU

103 APLICAÇÃO DAS TECNOLOGIAS DE FABRICO ADITIVO EM ENGENHARIA DE TECIDOS E MEDICINA REGENERATIVA

OPINIÃO DE...

113 CONFIAR NO FABRICO ADITIVO E NO PAPEL DA NORMALIZAÇÃO

TECNOLOGIAS, MATERIAIS E DESAFIOS

115 ESTUDO COMPARATIVO ENTRE TECNOLOGIAS DE IMPRESSÃO 3D DESKTOP

124 O FABRICO ADITIVO POR EXTRUSÃO (MEX) E OS MATERIAIS METÁLICOS

134 FABRICO ADITIVO PARA COMPONENTES METÁLICOS DE GRANDE DIMENSÃO E ELEVADO DESEMPENHO

FABRICO ADITIVO, PRESENTE E FUTURO


ABÍLIO DE JESUS
DEMec, FEUP


HÉLDER PUGA
DEM, UM


PEDRO ROSA
DEM, IST

Outrora vista como antiquada e ferrugenta, a indústria transformadora voltou a ganhar relevância, agora revestida por uma imagem mais moderna e inovadora. Hoje, repleta de estilo e versatilidade, rejuvenesce as tecnologias tradicionais e recupera as tecnologias precoces de prototipagem rápida dos anos 90, que agora ganham fama entre empresas e conquistam todos os públicos. Nas prateleiras de lojas físicas e digitais, pequenas máquinas-ferramenta desafiam muitos mais jovens em ideias disruptivas do que as outras fechadas em naves industriais e laboratórios académicos. Esta é a dinâmica que serve de motor a uma democratização descentralizada do Fabrico Aditivo (FA) para permitir a qualquer graúdo obter aquele componente mecânico de precisão que tanta falta faz na linha de produção. Mas, não tendo a imaginação limites, será de esperar que amanhã de manhã, numa qualquer cozinha ao lado da máquina do café, tenhamos uma máquina-ferramenta de FA a imprimir o pequeno-almoço, e à tarde a contribuir em soluções inovadoras para problemas reais dos setores da saúde, energia, mobilidade, metalomecânica, militar, ambiente, ou de qualquer outra carência da sociedade em geral. A importância crescente do FA na indústria e na economia mundial é inegável. Importa agora acompanhar e resolver os desafios colocados na escolha dos materiais apropriados para cada aplicação, a definição das operações de pós-processamento, e a caracterização da qualidade do produto que almejamos.

A Divisão Técnica de Tecnologia e Processamento de Materiais (DT TPM), criada na Assembleia Geral da SPM de 2021, tem como principal objetivo contribuir para a dinamização da investigação e disseminação em tecnologias de produção de componentes mecânicos num enquadramento de constante evolução dos materiais e das tecnologias de fabrico e respeito pela sustentabilidade ambiental e social. Assim, a sua tarefa mais importante no domínio das tecnologias de produção é a divulgação do estado-da-arte e das tendências de desenvolvimento ao nível internacional, assim como, identificar as tecnologias de fabrico emergentes e as entidades a operar em Portugal.

Com o título **"Fabrico Aditivo, Presente e Futuro"**, esta edição da Revista Ciência & Tecnologia dos Materiais, promovida pela DT TPM, procura estabelecer um ponto de encontro das diversas entidades a operar no domínio do Fabrico Aditivo em Portugal. Apresenta os desenvolvimentos recentes através de diversos artigos técnicos e científicos, artigos de opinião, assim como a disseminação dos resultados de projetos I&DT. É igualmente intenção a divulgação de produtos e serviços para aqueles que pretendem o fabrico aditivo de componentes, adquirir a tecnologia para a sua empresa, ou a compra de materiais para as suas máquinas. É dado um destaque a trabalhos de investigação com uma abrangência mais ampla no que respeita aos tipos de materiais processados e em diversos setores, em especial a utilização de novos materiais. Numa outra perspetiva, apresenta-se a visão futura de investigadores com carreiras bem estabelecidas neste domínio, surgindo como um contributo de referência para aqueles que iniciam agora a sua atividade de investigação na área do fabrico aditivo.

Com esta edição, esperamos incentivar a comunidade que, de uma forma ou de outra, desenvolve atividades económicas relacionadas com o fabrico de componentes mecânicos, a juntar-se à DT TPM e a divulgar as suas iniciativas em projetos futuros. Independentemente de estas envolverem adição, subtração ou replicação de forma, o objetivo é contribuir para o fortalecimento e o engrandecimento da área das tecnologias de processamento de materiais, que tem sido um dos pilares da criação de riqueza no nosso país.

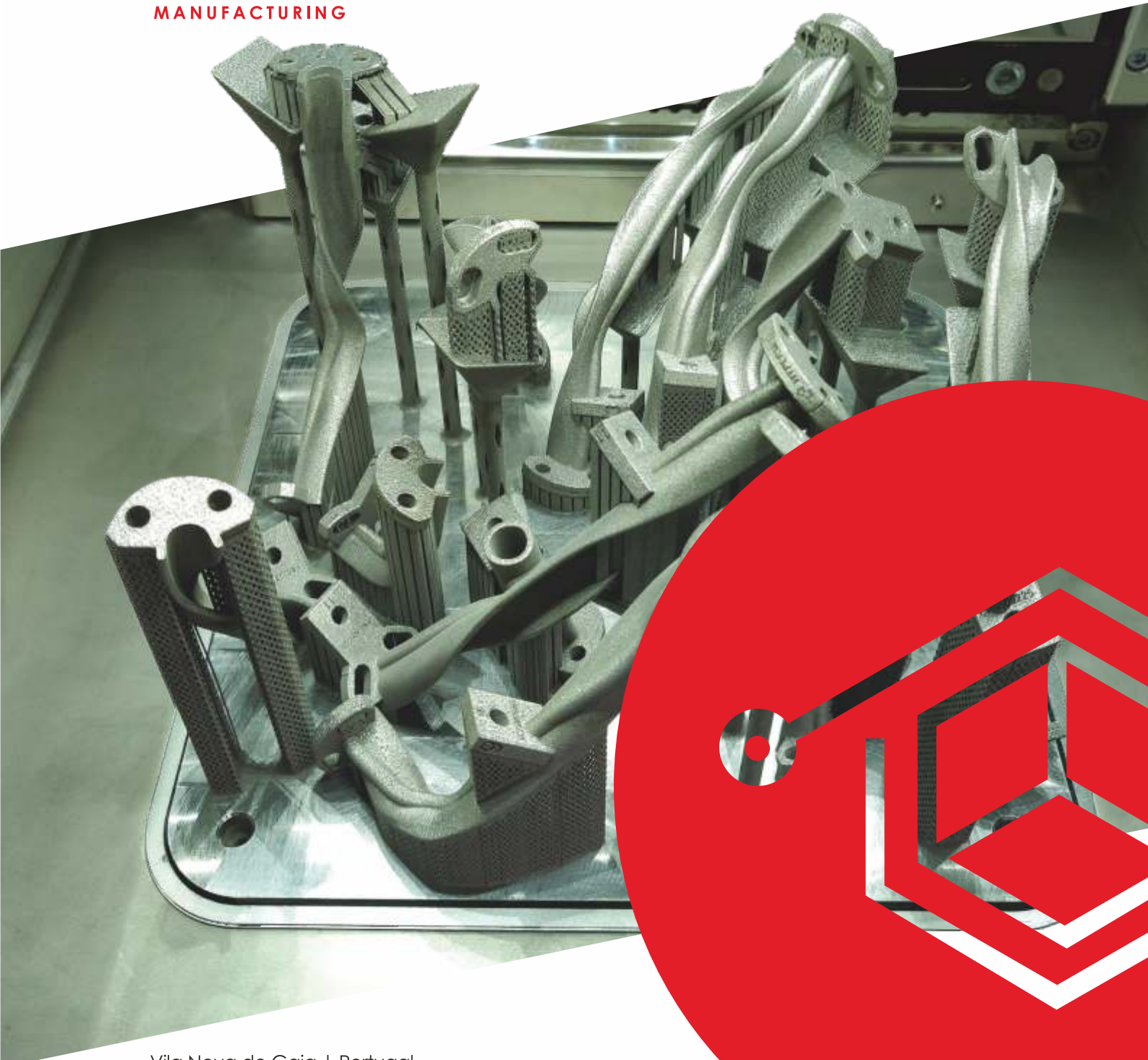
HYPER METAL

METAL ADDITIVE MANUFACTURING

Laser Powder Bed Fusion

Infinitas possibilidades de design, vasta gama de metais

Uma referência nos sectores industrial e espacial



Vila Nova de Gaia | Portugal

+351 220 135 162 **info@hypermetal.eu**

www.hypermetal.eu

3DCP COMO RESPOSTA ÀS CRISES DE MÃO-DE-OBRA, DE HABITAÇÃO E CLIMÁTICA

JOÃO GONDAR | FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO, MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Ao analisar o recente relatório *Building Materials and the Climate: Constructing a New Future* elaborado no âmbito da *Global Alliance for Buildings and Construction (GlobalABC)* por parte do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) e pelo *Yale Center for Ecosystems + Architecture* [1], constata-se que o setor da construção é, de longe, o maior emissor de gases com efeito de estufa, sendo responsável por uns impressionantes 37% das emissões globais.

De acordo com o estudo *O Parque Habitacional - análise e evolução: 2011-2021*, realizado pelo Instituto Nacional de Estatística (INE) em colaboração com o Laboratório Nacional de Engenharia Civil, "Os resultados dos Censos 2021 revelaram um abrandamento no crescimento do parque habitacional, com aumentos de apenas 0,8% para os edifícios e 1,9% para os alojamentos familiares clássicos em relação a 2011, um crescimento significativamente inferior ao observado em décadas anteriores." Em 2011, a "(...) proporção de alojamentos sobrelotados era de 12,7%. Entre 2011 e 2021 registou-se um aumento de 17,1% de alojamentos sobrelotados para 527 mil". O número insuficiente de construção de novas habitações, aliada a um aumento significativo de alojamentos sobrelotados, contribuem para uma crise de habitação em Portugal sem precedentes [2].

De acordo com o relatório *O Futuro do Trabalho em Portugal: O Imperativo da Requalificação*, "O presente ciclo económico no qual se encontra Portugal, por exemplo, com baixa taxa de desemprego faz com que empresas tenham mais dificuldade em encontrar mão-de-obra, o que por sua vez incentiva o investimento em automação" [3].

A construção civil é também responsável por um grande consumo de recursos naturais e uma grande produção de resíduos. Há por isso uma crescente necessidade em reduzir o consumo de materiais não renováveis, fazendo a sua substituição por materiais alternativos aos tradicionais, reciclados. Há diversos estudos nesse sentido, sendo a exemplo o estudo *Use of Waste Materials to Reduce Cement and Natural Aggregates in 3D Printing Mortars* [4] que estuda a possibilidade do uso de resíduos de construção e demolição como agregado, a substituição de areia natural por areias provenientes de tijolos reciclados e ainda cinzas de bagaço de cana-de-açúcar como substituto do cimento de Portland.

A RESPOSTA

"Na Havelar, acreditamos num futuro onde a tecnologia na construção impulsiona soluções sustentáveis, capacita comunidades globais e democratiza o acesso a designs habitacionais exclusivos". É esta a filosofia que orienta a Havelar, empresa portuguesa que promete transformar o panorama da construção civil no país, responsável pela construção da primeira casa impressa em 3D em território nacional, como por exemplo foi testemunhado na rubrica da SIC *Futuro Hoje* por Lourenço Medeiros no passado dia 19 de março [5].

De forma a responder às crises de mão-de-obra, de habitação e climática, a Havelar propõe uma forma inovadora de construir novas habitações em Portugal: a impressão 3D de betão (em inglês *3D Construction Printing - 3DCP*). Durante a recente construção da primeira casa produzida desta forma em Portugal, a Havelar foi capaz de erguer as paredes da casa em apenas 18 horas de impressão contínua. Em pouco tempo, foi possível erguer uma casa completamente funcional, desde a fundação até ao acabamento final, recorrendo a um misto de construção *off-site* (em fábrica) e *on-site* (no local), combinando a eficiência da produção em fábrica com a adaptabilidade e personalização requeridas no local de construção.

O PROCESSO

O processo tecnológico da Havelar é baseado na impressão 3D com extrusão de material. Após a mistura dos componentes que compõe o betão Havelar, este é enviado para o extrusor da impressora, sendo posteriormente depositado camada sobre camada (Figura 1 à direita no topo). Desta forma, são criadas as paredes exteriores e interiores da casa, formando as divisões e os seus espaços interiores (Figura 1 à direita, centro). É possível assim construir de forma precisa e eficiente, onde cada camada é cuidadosamente colocada de acordo com o projeto específico, simultaneamente produzindo uma habitação personalizada, de alta qualidade e com a possibilidade de um acabamento típico de algo impresso em 3D (Figura 1 à direita, inferior).

Com a utilização de tecnologias de impressão 3D, é também possível construir casas num tempo bastante curto quando comparado com métodos de construção tradicionais, especialmente quando se tem em consideração o tempo de impressão das paredes da casa.

Uma vez que este tipo de processos permite colocar material estritamente onde é necessário, sendo o material produzido praticamente todo utilizado na impressão, é possível obter uma redução significativa tanto do material utilizado na construção, bem como dos resíduos gerados durante o processo de construção, conseguindo assim contribuir significativamente para a redução do impacto ambiental da construção civil.

Com a necessidade de utilização de apenas quatro pessoas no local de obra durante a fase de impressão, através do elevado grau de automação que tecnologias como a 3DCP permitem, é conseguida uma redução significativa da necessidade de mão-de-obra. É conseguido também um aumento de eficiência no processo de construção, conseguindo assim otimizar a produção e, simultaneamente, garantir a qualidade das habitações construídas. Para operar de forma eficiente, é necessário um operador da impressora que controla em tempo real todo o processo, um operador de materiais que produz e faz o controlo contínuo do material a depositar, um ajudante de operador da impressora para colocação dos reforços ao longo da deposição das camadas e um ajudante do operador de materiais que realiza o abastecimento de material. Os reforços podem ser desde pequenos segmentos de varão de aço nervurado colocados num determinado padrão até à inclusão de certas geometrias no desenho do interior da parede que confiram estas mesmas



FIGURA 1
Extrusão da mistura Havelar (no topo) e a primeira casa impressa em 3D em Portugal em fase de construção (ao meio) e pormenor da parede exterior (em baixo)

propriedades. Estes locais são possíveis de observar na Figura 2, onde é possível notar o silo de armazenamento do cimento, os silos de areia e agregados juntamente com o misturador e a bomba num plano mais aproximado, secção a que corresponde o operador de materiais e o seu ajudante e ao fundo a impressora da responsabilidade do seu operador e ajudante. Uma representação esquemática das áreas de operação é visível na Figura 3.

De forma a obter uma eficiência energética elevada mantendo ao mesmo tempo a pegada ecológica da construção baixa, é colocado como material isolante, entre as paredes exterior e interior, um granulado de cortiça, material esse também obtido localmente e com o adicional de possuir a capacidade de reter CO2 na sua composição. Outros materiais de origem natural que possuem estas propriedades podem também ser considerados para esta função, como por exemplo palha, fibras de coco ou fibras de celulose [7].

A MISSÃO

Além das vantagens técnicas que a impressão 3D de betão oferece, a missão da Havelar passa pela construção de comunidades, oferecendo não apenas casas, mas também desenvolvimento urbano sustentável. Ao focar-se em projetos de média e grande escala, é possível, dessa forma, otimizar os processos de produção e reduzir os custos de cada habitação, aplicando conceitos de economia de escala em todas as etapas do processo, desde a aquisição de materiais até à execução da obra. Isto permite não só tornar as casas mais acessíveis, mas também permite atender à crescente procura por habitação de forma eficiente e sustentável.

Focando-se na construção de comunidades residenciais, o conceito de habitação social é reinventado, oferecendo simultaneamente projetos esteticamente agradáveis e acessíveis que elevam os padrões de qualidade e design, criando espaços onde as pessoas podem viver com dignidade e conforto, promovendo assim o



FIGURA 2
Local de obra típico com a central de produção do material num plano mais próximo e a área de impressão mais ao fundo [6].

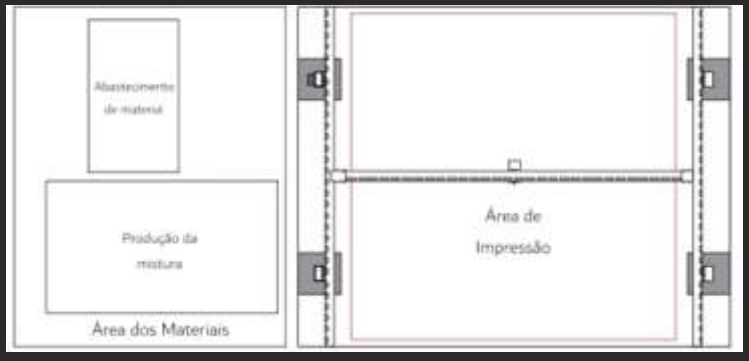


FIGURA 3
Representação esquemática de um local de obra com as respetivas áreas

bem-estar e a coesão social. Na Figura 4 é possível observar, em cima, a casa Havelar finalizada, em baixo, um pormenor do interior da casa, notando-se a conjugação do betão das paredes com a madeira e o branco do teto.

CONCLUSÃO

A impressão 3D de betão é já uma realidade com uma tendência de crescimento acentuado na área da construção de habitações. A Havelar está a demonstrar que é possível construir de forma mais rápida, mais barata e ecológica através do uso de tecnologias de impressão 3D em betão, traçando o caminho para um cenário em que a construção é simultaneamente rápida, eficiente e ecologicamente sustentável com o desenvolvimento de materiais de construção inovadores e eficientes em termos de emissões de CO2.

Face à situação existente, será assim possível no futuro incluir cada vez mais materiais sustentáveis na construção por impressão 3D, substituindo o betão atualmente utilizado que é mais próximo do tradicional por soluções neutras em carbono, procurando simultaneamente oferecer habitação acessível a um público cada vez mais abrangente.



FIGURA 4
Casa Havelar (em cima) e pormenor da sala de refeições (em baixo).

REFERÊNCIAS

[1] United Nations Environment Programme e Yale Center for Ecosystems + Architecture, "Building Materials and the Climate: Constructing a New Future," 2023.

[2] Instituto Nacional de Estatística e Laboratório Nacional de Engenharia Civil, "O Parque Habitacional: Análise e Evolução - 2011-2021," 2024.

[3] Nova SBE e CIP - Confederação Empresarial de Portugal, "O Futuro do Trabalho em Portugal: O Imperativo da Requalificação," 2019.

[4] M. Jesus, J. Costa, J. Teixeira, S. Pessoa, A. S. Guimarães, B. Rangel, L. Moreira, L. Maia, R. Neto e J. L. Alves, "Use of Waste Materials to Reduce Cement and Natural Aggregates in 3D Printing Mortars," em *3D Printing for Construction with Alternative Materials*, Springer, 2023.

[5] L. Medeiros, "Futuro Hoje: Vou ali imprimir uma casa e já venho," *SIC*, 19 março 2024.

[6] A. T. Marques, "Complexo de casas 3D nasce no Grande Porto," *Jornal de Notícias*, 11 maio 2024.

[7] D. Bozsaky, "Nature-Based Thermal Insulation Materials From Renewable Resources - A State-Of-The-Art Review," *Slovak Journal of Civil Engineering*, 6 abril 2019.



IMPRESSÃO 3D ULTRA-RÁPIDA DA NORCAM - 3DZ NOS COMBOIOS DE ALTA VELOCIDADE DA ALSTOM

PEDRO COSTA | DIRETOR COMERCIAL NORCAM

Apoios de pés impressos em 3D para prolongar o ciclo de vida das carruagens ferroviárias da ALSTOM, com uma poupança de custos de 75% e uma redução do prazo de entrega de 172 dias.

A EMPRESA

A ALSTOM é uma das maiores empresas ferroviárias do mundo. Os comboios de alta velocidade que produz podem ser encontrados em todos os principais mercados ferroviários dos 6 continentes e em mais de 60 países em todo o mundo. Com sede em França, a ALSTOM tem centenas de fábricas em todo o mundo, incluindo dois centros de excelência em Savigliano (Cuneo) e Bolonha, e um grande centro de produção e serviços em Sesto San Giovanni (Milão). É aqui que se encontra Lorenzo Gasparoni, que, para além de ser responsável pela gestão dos esquemas e equipamentos elétricos dos comboios, coordena os projetos de impressão 3D e digitalização 3D. A impressão 3D chegou à ALSTOM em 2019, como parte de um projeto de inovação, mas nos últimos dois anos, a produção de peças com fabrico aditivo está a revelar-se uma opção de produção frequente.

O DESAFIO: Assegurar a assistência a carruagens ferroviárias antigas em todo o mundo.

Embora a ALSTOM produza motores e carruagens de alta velocidade avançados e da próxima geração,

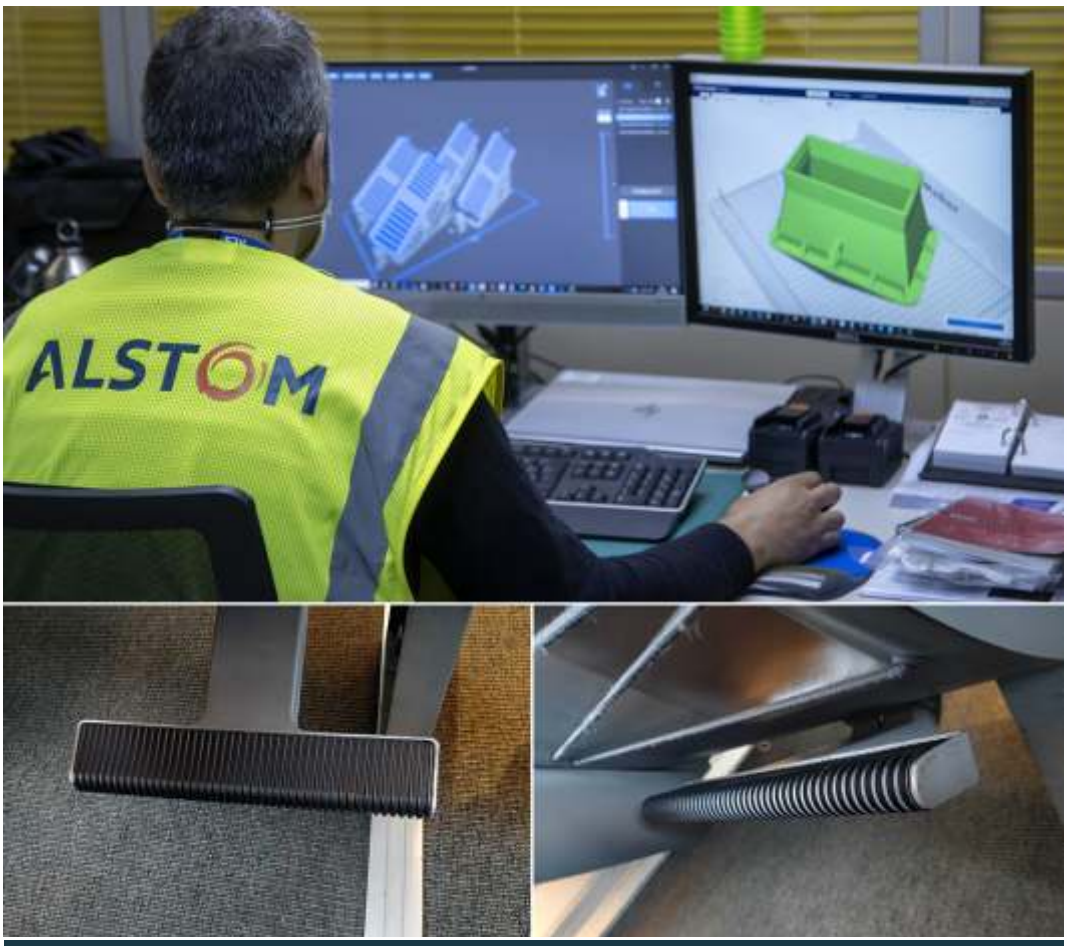


FIGURA 1
Desenvolvimento de apoios de pés para o comboio ETR575

também presta serviços a uma grande base de clientes existentes, com frotas que podem ter mais de 30 anos. À medida que a frota envelhece, há inúmeros componentes que precisam de ser reparados ou substituídos para prolongar a vida útil de um veículo ferroviário. ***"Ao fim de 30 anos, pode acontecer que os fornecedores originais do produto já não existam, ou que os moldes utilizados para produzir as peças tenham sido destruídos, porque ao fim de 30 anos é um custo até para manter um molde"***, diz Gasparoni. Pode dizer-se que, nestes casos, pode ser realmente um desafio encontrar ou produzir peças de substituição. Em meados de 2022, a equipa de Gasparoni foi incumbida de produzir 200 apoios de pés para o ETR575 que precisavam de ser substituídos por estarem gastos ou danificados. A ALSTOM decidiu utilizar a impressão 3D como alternativa à maquinagem de um novo molde e à moldagem por injeção, uma vez que os volumes envolvidos eram relativamente baixos. Estes apoios para os pés são elementos que estão sujeitos a uma utilização intensiva e cuja superfície é visível para os passageiros.

Optar por uma impressora 3D ultra-rápida melhorou a capacidade da ALSTOM para responder prontamente às necessidades urgentes dos clientes: ***"Para os nossos clientes, parar um comboio para esperar por peças sobressalentes é extremamente dispendioso, por isso temos de ser capazes de lhes fornecer uma solução rápida."***

AJUDA CONCRETA NA FASE DE TESTE E SELECÇÃO. O papel da Norcam - 3DZ.

No verão de 2022, a equipa de Lorenzo recorreu à 3DZ para obter aconselhamento sobre uma impressora 3D que cumprisse os requisitos para estas peças de utilização final. A 3DZ é um revendedor das melhores marcas de impressoras e scanners 3D e acompanha as empresas na escolha da tecnologia mais adequada para a sua aplicação específica.

Lorenzo Gasparoni afirma: ***"No grande showroom da 3DZ, pudemos tocar em várias tecnologias de impressão e vê-las em ação. Trabalhámos em estreita colaboração com a equipa de engenheiros de aplicação da 3DZ para encontrar a tecnologia e o material de impressão certos para nós: foram realizados vários testes, utilizando diferentes impressoras 3D e resinas, para comparar e verificar a qualidade estética e a resistência da peça final.***

Nesta fase, foi uma mais-valia sermos acompanhados por uma pessoa dedicada, com conhecimentos profundos e experiência prática das máquinas. Inicialmente, considerámos outras tecnologias, incluindo várias opções de resina, mas no final, depois de examinarmos as peças impressas e os materiais, escolhemos a Nexa3D, que se revelou a opção mais adequada às nossas necessidades". E assim, em setembro de 2022, a equipa de Lorenzo Gasparoni adicionou a impressora 3D ultra-rápida Nexa3D à sua frota de trabalho.

Os elementos-chave que foram decisivos na escolha desta impressora foram:
- o grande volume de construção
- a alta velocidade de fabrico
- as resinas de componente único
- a plataforma aberta

Os técnicos da 3DZ instalaram a máquina e formaram o pessoal da ALSTOM para que pudessem explorar imediatamente todo o potencial da impressora Nexa3D. Em poucas semanas estavam a produzir peças finais.

A SOLUÇÃO: IMPRESSÃO 3D DE 30 PLATAFORMAS DE APOIO EM 10 HORAS

Depois de instalarem a sua nova impressora 3D ultra-rápida, puseram-se a trabalhar na impressão de plataformas de apoio para os pés.

A impressora 3D demora apenas 10 horas a produzir 30 apoios para os pés. Ao orientar a peça verticalmente, foi possível otimizar a capacidade da placa de impressão, aumentando a produtividade. A resina xABS3843, produzida pela Henkel Loctite, é um excelente substituto para o Lexan, o material em que os apoios para os pés originais foram fabricados. A resina XXABS3843 revela-se estável e durável ao longo do tempo, e a qualidade de impressão é tão boa que não é necessário qualquer acabamento, aplicação de primário ou pintura da peça antes de a utilizar em carruagens de comboios. Este facto contribui para uma redução significativa do prazo de entrega.

Além disso, Lorenzo salienta que as peças impressas em 3D permitem poupar muito dinheiro: ***"A quantidade mínima de encomenda para a moldagem por injeção é superior a 500 peças e, com esse volume, o custo é de cerca de 200 euros por peça. Não existe uma quantidade mínima e o custo é de 50 euros por peça, pelo que é muito mais acessível".***

Até à data, a equipa da ALSTOM produziu mais de 100 plataformas de substituição que foram instaladas em carruagens ferroviárias. Depois de um exemplo tão bem sucedido como o dos apoios para os pés, existem todos os pré-requisitos para aumentar a utilização das impressoras 3D para fabricar outras peças sobresselentes e muito mais.



FIGURA 2
Apoios de pés para o comboio ETR575 produzidos por fabrico aditivo.

CLIENTE
ALSTOM

SECTOR INDUSTRIAL
Transporte ferroviário

APLICAÇÃO
Produção de apoios para os pés de substituição

SOLUÇÕES UTILIZADAS
- *Impressora 3D industrial Nexa*
- *Resina xABS3843 (fabricada pela Henkel Loctite)*
- *Análise de viabilidade e pré-testes com a 3DZ*

VANTAGENS
- *Peças de substituição imediatamente disponíveis.* ***Redução de 96% no tempo de espera***
- ***75% de redução do custo por peça*** *em comparação com o custo de pequenos lotes moldados*
- ***Redução do trabalho de acabamento:*** *a elevada qualidade da superfície elimina a necessidade de lixar, pintar e aplicar primário*
- *Resina xABS com estabilidade e durabilidade a longo prazo para peças sujeitas a utilização intensiva*

IMPRESSÃO 3D DE BAIXO CUSTO E ACABAMENTOS SUPERFICIAIS

ILSE MATUS | 3D MAKER

A 3DMaker teve os seus inícios em 2017, quando a atual diretora da marca estava a frequentar a sua licenciatura em Design Industrial na Escola Superior de Arte e Design e viu na necessidade da prototipagem, uma oportunidade. Como é habitual na área do design, constantemente materializamos as ideias mediante o fabrico de protótipos para validar o design, tamanho, utilização, materiais e aplicar os ajustes necessários para definir o produto final. O fabrico aditivo, longe de ser apenas uma curiosidade tecnológica, tem revolucionado a maneira como projetamos e fabricamos produtos. A impressão 3D tornou-se uma ferramenta promissora para diversos setores da indústria, permitindo a produção de peças personalizadas, o fabrico de geometrias complexas, redução de custos, eficiência do material, inovação e prototipagem rápida, integração de materiais sustentáveis e novas funcionalidades para o desenvolvimento de produtos.

No início da 3DMaker foram ultrapassados diversos desafios para dominar a técnica, nomeadamente os materiais e os parâmetros de impressão. As dificuldades podem atrasar quem quer vencer na vida, mas só servem para acelerar a sua determinação. Foi este o principal lema para levar a marca para além-fronteiras. Numa altura em que os trabalhos desenvolvidos saíram das salas de aula e entraram com força na indústria, os primeiros desafios incluíam o desenvolvimento de protótipos funcionais para fabrico de moldes de injeção, produção em série de componentes plásticos para a indústria automóvel, de iluminação e metalúrgica. Com o aumento do volume do negócio e com o estabelecimento de uma parceria em conjunto com a Codemaker, foram abertos dois escritórios de trabalho no centro da Maia.

A 3DMaker oferece diversos serviços que contemplam todas as fases da execução de um projeto de design: suporte técnico ao cliente na definição da ideia, modelação 3D paramétrica e orgânica, renderização e animação 3D direcionada para produtos, impressão 3D (FFF - fabricação por filamentos fundidos, e DLP - processamento digital de luz), acabamentos de pintura avançada e gravação laser. O fator diferenciador é dar ao cliente a possibilidade de utilizar a tecnologia da impressão 3D e tornar o produto numa peça final com acabamentos de alta qualidade e definição, que se integra perfeitamente nos diferentes materiais poliméricos utilizados. Os acabamentos permitem alisar as superfícies e aplicar pintura artística, cromada ou de base (Figura 1).



FIGURA 1
Diferentes tipos de acabamentos para o tratamento das superfícies.

Com esta técnica, o volume de impressão deixa de ser uma limitação para as impressoras de filamento, visto que é possível produzir um projeto de grande dimensão, composto por uma ou várias partes, onde a aplicação de um acabamento final vai eliminar as juntas de união e tornará o objeto numa peça única integrada (Figura 2).

O processo da preparação das peças é fundamental para conseguir um resultado de elevada qualidade. Inicialmente é dado um polimento sobre a superfície para eliminar imperfeições ou relevos indesejados para posteriormente aplicar uma camada de base branca, o Basecoat, um primário de alto enchimento que foi quimicamente projetado para fornecer o melhor desempenho de pintura. As suas propriedades de auto nivelamento garantem que a superfície do objeto fique sempre lisa e brilhante.
Dependendo do tipo de acabamento requerido, existem dois processos adicionais. Para acabamentos cromados, é aplicado o Metal



FIGURA 2
Mind Race Circuito da Fórmula 1, Yas Marine, Abu Dhabi (Emirados Árabes Unidos). O projeto reproduz os principais monumentos que compõem o circuito para evento de carreiras onde os participantes controlam os carros com o poder da mente. 3D Maker 2019.

Spray, uma solução única de nitrato de prata sobre o Basecoat. Esta camada rapidamente se transforma num acabamento de espelho brilhante. Por último é aplicado o Topcoat, um verniz de alta qualidade que irá definir a tonalidade da cor desejada e conferirá o revestimento protetor final. Esta camada garante uma maior durabilidade, proteção UV (ultra-violeta) aprimorada e uma maior resistência a arranhões e impactos; por outro lado, se o acabamento for Pintura Artística ou Pintura Base, posterior ao Basecoat, a peça é isolada em determinadas zonas para aplicar as cores segundo requerido. Para projetos artísticos com elevado nível de detalhes são utilizados pincéis ou aerógrafos. Nos casos onde se pretende apenas um acabamento uniforme monocromático, é aplicado o Topcoat com um verniz mate, acetinado ou brilhante. Finalmente é aplicado o verniz transparente para proteger e selar a superfície.

Existem projetos que requerem superfícies com relevos ou texturas específicas. Para estes casos é possível projetar as texturas diretamente no modelo 3D ou aplicá-las posteriormente (Figura.3). A impressão 3D tem sido utilizada em diferentes aplicações, como a decoração de espaços, eventos corporativos, campanhas publicitárias, entrega de prémios, maquetes de arquitetura, componentes para estruturas de iluminação e caixilharia, reprodução de peças descontinuadas ou fora da linha de fabrico, e protótipos funcionais para validação, fabrico de moldes ou desenvolvimento de patentes (Figura 4).

Para além de projetos executados para a indústria, a impressão 3D tem sido utilizada amplamente em estudos científicos e de ensino, demonstrando a sua potencialidade e versatilidade para promover a inovação e novos métodos de aprendizagem. A 3DMaker deu apoio técnico no desenvolvimento e produção de suportes para seringas e criação de órgãos caninos, para que estudantes de medicina veterinária aprendessem metodologias de amostragem em objetos que simulam anatomia animal, evitando assim o uso de animais reais para este tipo de exercícios (Figura 5). O projeto resultou na publicação de dois artigos [1, 2] e no



FIGURA 3
Mind Race, Old Town, Riyadh, Arabia Saudita. O projeto reproduz a histórica cidade antiga Diryadh. Acabamento texturizado. 3D Maker 2024.

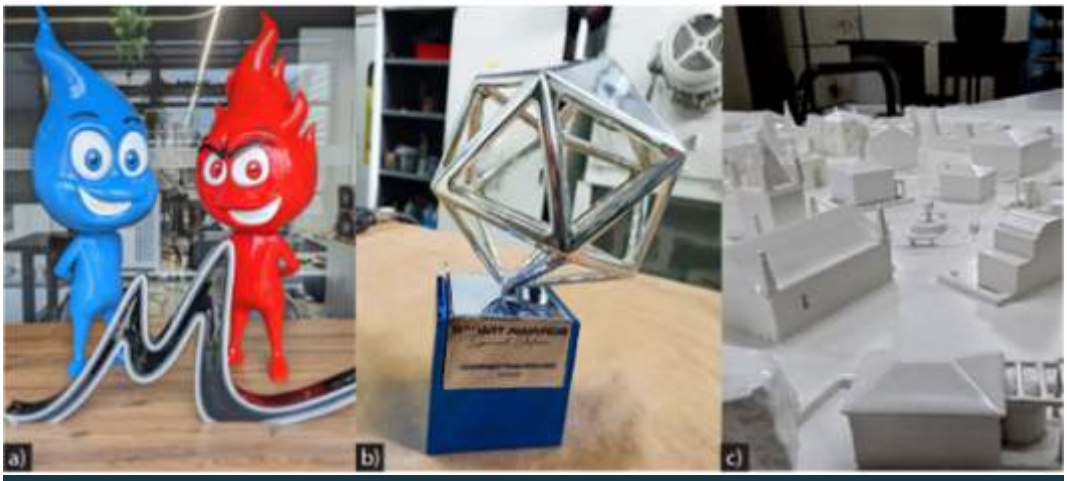


FIGURA 4
Projetos de campanhas publicitárias e maquetes de arquitetura.
(a) Companha publicitária MProductions - Luxemburgo, 2023; (b) Troféu Wit Awards, Lisboa, 2023;
(c) Maquete à escala, Portugal dos Pequenitos, Coimbra, 2023.

pedido de uma patente.

O fabrico aditivo está a alargar horizontes e a evoluir progressivamente no setor da construção civil, na medicina e na indústria alimentar, mas também está a ampliar fronteiras para aplicações inovadoras na área ambiental, tal como a restauração marinha.

No âmbito do Mestrado em Design Industrial e de Produto da Universidade do Porto, e atualmente no programa Doutoral de Ciência, Tecnologia e Gestão do Mar da Universidade do Porto, encontramo-nos a realizar uma investigação que utiliza tecnologias de impressão 3D para desenvolver substratos de propagação de corais e recifes artificiais com o objetivo de restaurar zonas marinhas degradadas e promover a colonização de espécies. Foram desenvolvidas argamassas compostas por resíduos de concha de mexilhão, calcário, areia dolomítica, cimento e materiais pozolânicos. Foram submersos diversos substratos em aquários, com diferentes espécies de corais para estudar a evolução, adaptação, crescimento e preferências de assentamento que variam dependendo da composição química, morfologia e textura dos substratos produzidos (Figura 6). Com resultados muito promissores, a formulação está a ser adaptada para possibilitar a extrusão do material em impressoras de grande porte, com o objetivo de fabricar módulos de recifes artificiais e implementá-los no mar. O estudo tem permitido a participação em diversos congressos e conferências, assim como a publicação de artigos científicos [3, 4].



FIGURA 5
Projetos desenvolvidos pelo ICBAS (Instituto de Ciências Biomédicas Abel Salazar) que envolveram as etapas de modelação 3D até a impressão 3D para facilitar métodos de amostragem animal. 3D Maker 2022.



FIGURA 6
Processo de evolução e crescimento de fragmentos de coral nos substratos 3D desenvolvidos.

Toda a informação relevante ao progresso desta investigação pode ser visitada no website ***www.reefdesign.pt***

REFERÊNCIAS

[1] Marcos, R., Fonte-Oliveira, L., Santos, M., Caniatti, M., 2023a. An immersive simulation strategy to teach cytology sample collection methods and basic diagnosis skills: A two academic center study. Vet. Clin. Pathol. 52, 722-731. https://doi.org/10.1111/vcp.13280

[2] Marcos, R., Moreira, R., Macedo, S., Lopes, G., 2023b. Development and Validation of a Simulation Model for Collection of Canine Vaginal Samples. J. Vet. Med. Educ. e20220141. https://doi.org/10.3138/jvme-2022-0141

[3] Matus, I., Alves, J.L, Góis, J., Rocha, A., Neto, R., Mota, C., 2021. Effect of 3D printer enabled surface morphology and composition on coral growth in artificial reefs. Rapid Prototyping Journal. https://doi.org/10.1108/RPJ-07-2020-0165

[4] Matus, I.V, Alves, J.L, Góis, J.,Vaz-Pires, P., 2024. Artificial Reefs Through Additive Manufacturing: A Review of Their Design, Purposes and Fabrication Process for Marine Restoration and Management. Rapid Prototyping Journal. https://doi.org/10.1108/RPJ-07-2023-0222



JOÃO DE DEUS E FILHOS - UM PERCURSO PELA IMPRESSÃO 3D

LUÍS NEVES | JOÃO DE DEUS & FILHOS

A João de Deus & Filhos é uma empresa centenária, fundada em 1914, e dedicada ao ramo automóvel desde a sua fundação. Primeiro na reparação e posteriormente no fabrico de permutadores de calor. Desde 2001, faz parte do Grupo DENSO, e é um dos players europeus no fabrico de permutadores de calor para o ramo automóvel. Produz cerca de 2.5 milhões de componentes anualmente, com tendência a crescimento, fruto dos investimentos realizados nos últimos três anos, cobrindo as necessidades da mobilidade a combustão interna, híbrida, eléctrica e, mais recentemente, também a mobilidade assente no hidrogénio. Entre os clientes referência encontram-se os grupos VW, Stellantis e a Toyota.

A empresa tem a particularidade de realizar todo o processo, desde o projecto e sua validação, produção, até à expedição do produto. O produto começa por ser idealizado com recurso a sofisticados softwares de CAD e CAE, onde o componente é optimizado de forma a garantir que tem a performance e robustez esperadas assim como a solução desenvolvida é exequível. Após esta fase, são produzidos protótipos de validação do desenho, onde poderão ser realizados ajustes ao desenho inicial e/ou novos inputs dos clientes são reavaliados. No fim desta fase, dá-se início ao fabrico das ferramentas e meios produtivos.

A JDEUS está situada em Porto Alto /Samora Correia e conta com 600 colaboradores. Detendo a responsabilidade de desenvolvimento dos produtos que produz, tem também a possibilidade de escolher os processos produtivos mais adequados ao fabrico dos componentes. No geral, e de uma forma muito simplista, os permutadores de calor são constituídos por um corpo central de alumínio, denominado ninho ou favo.

Adicionam-se componentes - caixas - que permitem a condução do fluido a arrefecer, glicol no caso dos radiadores e ar pressurizado nos casos dos intercoolers. No caso específico dos intercoolers, como mostrado abaixo, a geometria das caixas é fundamental para promover um correcto escoamento do ar. A boa ou má concepção deste componente, pode significar o sucesso ou insucesso de um projecto que, neste caso, terá como consequência a não nomeação da empresa para o projecto, e respectiva perda financeira pelo tempo investido.

Os componentes caixas são usualmente produzidas em plástico, por meio de moldação por injecção plástica ou, mais raramente, em alumínio fundido. Como este componente tem um papel fundamental, é muito importante que na fase prototipal se faça uma representação fiel da geometria optimizada no decurso da fase inicial de estudos. Tal implica a produção de moldes protótipos que, embora menores em custo e tempo de fabricação comparativamente aos moldes de série, são sempre elevados atendendo ao tempo de projecto.

Por esse motivo, a empresa tem desenvolvido, junto com os seus parceiros nacionais na área dos moldes, formas de redução de tempos de produção e a implementação de técnicas que permitam o rápido *fine tune* quando existe a necessidade de implementar pequenas correções. Por isso, desde o aparecimento das técnicas de impressão aditiva, que a empresa teve a intenção de implementar o método de impressão aditiva na produção das caixas.

O método de impressão aditiva, vulgarmente denominada impressão 3D, é composto por diversas técnicas. Estas técnicas têm evoluídos imenso nos últimos anos e o mercado tem oferecido um número crescente de materiais, factor preponderante para a implementação.
Desde a indústria aeronáutica, passando pela automóvel, até à medicina, são inúmeras as inovações nesta área. O método está de tal forma difundido que não é incomum estudantes de engenharia e *makers* terem uma pequena impressora.

O método veio para ficar, mas a sua aplicação não é directa a todo e qualquer produto. E, no que concerne à JDEUS, a sua aplicação tem sido desafiante atendendo ao componente que fabricamos. Tem sido uma aplicação crescente seguindo o normativo da ASME. A impressão aditiva, na descrição da ASME, é caraterizada por ter três fases de implementação crescente: Replicar, Adaptar e Optimizar.

Replicar tem por objectivo o tempo, Adaptar está relacionada com o custo e Optimizar remete para a recriação da geometria tendo por base a filosofia da impressão aditiva.

REPLICAR

A fase inicial de aplicação - Replicar - é por onde usualmente as empresas identificam o primeiro valor acrescentado deste método de fabrico pois permite obter componentes muito mais rápido. A geometria é idêntica à usada na moldação por injecção, sem qualquer alteração. Replicar uma geometria existente pode ser uma vantagem na medida em que não é necessário investir tempo no reajuste da geometria. Porém, isso pode também ser limitativo e prejudicial à criação da percepção do valor acrescentado do método.

Se o componente estiver submetido a elevadas temperaturas e elevadas pressões, como é o caso dos permutadores de calor, requer-se um cuidado extra na escolha do método de impressão aditiva assim como os materiais que tal método tem à escolha.

Há 18 anos, quando a empresa fez a sua primeira tentativa de aplicação da impressão aditiva, existia uma parca escolha de técnicas e de materiais. Abordámos uma das primeiras empresas nacionais nesta área (NORCAM) na tentativa de replicar a geometria de uma caixa de intercooler. O equipamento disponível, da ZCorp, produzia componentes em impressão 3D, por tecnologia inkjet. Desde o início que a inspiração para muita tecnologia foram as impressoras de papel e sua tecnologia. Para o primeiro teste usou-se uma geometria tipo de uma caixa de intercooler, que replicava exactamente o componente real. A tecnologia, como as actuais, assente na produção pela divisão por fatiamento, camada-a-camada, do CAD. Em seguida, o equipamento deposita, em cada uma das camadas, de forma sequencial, um binder ou cola da zona que replicam a fatia da geometria. O método requeria que no final promovesse-se uma cura, de forma a consolidar a robustez do componente produzido. Porém, devido à elevada espessura da geometria, 5mm, a cura actuou apenas na superfície do componente, na região de 1 mm e quando foi submetida à pressão usual de ensaio, o componente fracturou-se, em inúmeros pedaços.

O misto de geometria inadequada, processo e materiais não permitiu produzir um protótipo robusto o suficiente para suster as imposições de pressão e temperatura exigidas.

Foi uma primeira experiência que, apesar do revés, mostrou o potencial do método e a necessidade de acompanhar o desenvolvimento das técnicas, naquela altura, algo embrionárias.

ADAPTAR

Nos últimos anos e com a maturidade da avaliação deste método, somada à maior disponibilidade de técnicas como LPBF ou SLS/Multijet Print, e respectivos porfólios de materiais, mais vastos que no passado, foi possível obter componentes que tem potencial para a aplicação directa no produto.

Em particular, os componentes metálicos (alumínio) produzidos por LPBF (Laser Power Bed Fusion) substituem na perfeição os componentes metálicos maquinados e na maior parte das vezes, devido à geometria particular e de difícil maquinagem, são de custo inferior à versão maquinada. Este é um importante aspecto a considerar pois, de nada serve uma tecnologia, se os clientes não estão dispostos a pagar o diferencial de custo para a tecnologia alternativa. Esta abordagem tem sido aplicada em componentes de protótipo, e quando a empresa se socorre desta tecnologia, tem sido possível inclusive obter componentes em tempo

inferior ao que seria normalmente indicado para a maquinagem de metal, de geometria igualmente complexa. Tais componentes, produzidos por impressão 3D em metal, são equivalentes em comportamento mecânico à sua alternativa maquinada. Por isso, podem sempre que o factor económico e/ou temporal o permite, a empesa aplica esta solução.

Notar que pode existir a necessidade de maquinagem posterior dos componentes impressos em metal, em particular nas regiões que serão de união a outros componentes e que estão obrigadas a cumprir determinados normativos de qualidade superficial e/ou geométrico. Nestes casos, considera-se que estamos perante uma produção híbrida, aditiva para obter o componente global e subtrativa para refinar determinadas regiões.

Mas nem sempre é possível usar componentes metálicos e quando existe a exigência de recorrer a componentes plásticos, mesmo com os grandes avanços das técnicas SLS, ou Multijet Print, os resultados ainda ficam aquém do exigido. A resistência mecânica do componente plástico ainda está aquém, como estava há 18 anos. A adaptação da geometria ao processo - obter ganhos ao nível de custo, depara-se com a inultrapassável menor resistência mecânica.

Por isso, neste tipo de componente plástico tivemos de avançar para a Optimização: subjugar o desenho do componente ao processo de fabrico e todas as possibilidades que a tecnologia permite. Em última análise, implementar um processo de design-to-manufacturing na impressão 3D.

OPTIMIZAR

A fase de optimização é o último estágio de aplicação do método de impressão aditiva. Neste estágio, o componente e sua função, são concebidos à luz das possibilidades e limitações da tecnologia de impressão. Livre dos constrangimentos típicos da maquinagem ou moldação plástica por injecção, todo um novo rol de possibilidades geométricas emerge. Pensar o produto, neste cenário, é tanto excepcional como desafiante e tem sido neste estágio que a empresa tem desenvolvido algum trabalho.

A empresa implementou uma abordagem de design mais orgânico de forma a incorporar o preceito da optimização nos seus componentes. Na Figura 2 um exemplo do estágio inicial desta implementação.

Porquê percorrer este caminho longo de desenvolvimento de todo um novo processo produtivo? Porque com a crescente pressão de redução de custos, importa abrir o leque de hipóteses produtivas, estando alerta para o que o mercado pode oferecer e que sirva de potencial aplicação futura nos componentes produzidos pela empresa. O valor de um molde de injecção plástica pode ascende a algumas centenas de milhar de euros, custo equivalente ao de uma impressora 3D industrial. É facto que o molde permitirá uma cadência produtiva muito maior que a impressão 3D mas para séries de menor dimensão faz todo o sentido fazer a análise financeira. O limite é a capacidade criativa de obter um novo produto, livre dos constrangi-mentos tipicamente impostos pelos métodos tradicionais.

Já existem toda uma panóplia de materiais, aos quais se adicionaram fibras de carbono, ou outros materiais exóticos como PEK ou PEEK, que poderão ser alternativas viáveis aos usados em injecção por moldação, uma vez os preços o permitam. Esse dia ainda está longe, mas para quem começou há 18 anos a testar a possibilidade de aplicar impressão 3D nos seus componen-

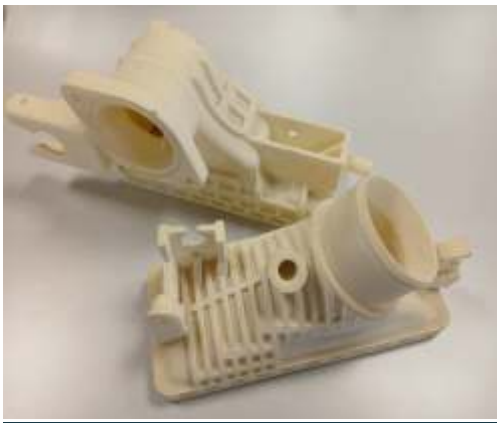


FIGURA 1
Caixas de Intercooler produzidas em SLA



FIGURA 2
Caixas de radiador produzidas por MultiJet Printing

tes, preferimos pensar que está mais perto do que alguma vez esteve.

PARA ALÉM DO PRODUTO

A empresa não restringe a aplicabilidade do fabrico aditivo exclusivamente ao produto, tendo aplicado em dois sectores: Gabaritos e Moldação plásticos por injecção (molde).

Os gabaritos são mecanismos essenciais para a produção de protótipos. O seu custo (residual) e tempo de produção (umas horas) torna-os interessantes para a empresa, que tem desenvolvido alguns conceitos de forma a substituir os actuais gabaritos posicionais (caros e longas semanas de espera), produzidos em metal maquinado, por outros produzidos por impressão aditiva. Mesmo que não na totalidade, mas grande parte dos elementos podem ser substituídos.

Tem também a vantagem que, se por algum motivo se danificarem, ou seja necessário modificar, facilmente pode produzir-se outro de custo residual e em poucas horas, como o primeiro. A moldação de plástico por injecção requer um correcto e preciso controlo da temperatura da superfície do molde. A taxa de arrefecimento do componente plástico e o equilíbrio de temperaturas no seio do componente é vital para a estabilidade dimensional da peça. Todavia, não é de fácil concepção o sistema de arrefecimento dos moldes, mas a introdução de técnica de impressão aditiva permitiu a produção de componentes contendo no seu interior canais de arrefecimento denominados *conformal cooling*. Estes canais não são passíveis de serem elaborados, pela sua complexidade, por outras técnicas. Um exemplo da aplicação desta técnica por um parceiro da JDEUS está ilustrado na Figura 4.



FIGURA 3
Gabarito de soldadura produzido em FFF.



FIGURA 4
Conformal Cooling - Dimlaser

CAPITAL HUMANO

A empresa JDEUS, como muitas outras, através do seu corpo de engenheiros, procurará usar todas as técnicas de que se possa socorrer para tornar o seu produto mais competitivo, mais eficiente e com melhor time-to-market. O método de impressão aditiva, onde incluímos a sua versão híbrida (aditiva + subtrativa) faz parte desse rol de métodos.

Tanto ou mais importante que os métodos disponíveis, é imperativo saber criar o ambiente de constante desafio para que o conhecimento seja criado, desenvolvido e, posteriormente vertido na superior qualidade do produto. É necessário formar as equipas directamente relacionadas com o desenvolvimento de produto, processo e produção para identificar as áreas onde existe aplicabilidade do método, seja identificável o seu valor acrescentado e consequentemente verificar quais os ganhos de eficiência, custo e qualidade.

FABRICO ADITIVO: DESAFIOS E O FUTURO DA PRODUÇÃO

MARCO LEITE | IDMEC, INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO, UNIVERSIDADE DE LISBOA, LISBOA, PORTUGAL

O fabrico aditivo, também conhecido como impressão 3D, foi anunciado como uma tecnologia transformadora com potencial para revolucionar o fabrico nos anos 80. As promessas das futuras fábricas onde os processos de fabrico tradicionais seriam substituídos por linhas de produção simplificadas, eficientes e altamente personalizáveis, conduzidas por impressoras 3D avançadas está, em 2024, ainda longe de ser realidade. Esta visão incluía a produção descentralizada, a redução do desperdício de materiais e a capacidade de produzir geometrias complexas que eram impossíveis com as técnicas convencionais. Apesar dos seus potenciais benefícios, a adoção generalizada do FA encontrou obstáculos significativos.

As lacunas atuais são particularmente evidentes nos aspetos relacionados com a formação em engenharia que, por sua vez são um fator crítico de sucesso na adoção de tecnologia por parte da indústria, especialmente em países como Portugal.

Um dos principais desafios para concretizar todo o potencial destas tecnologias reside na formação em engenharia. O ensino tradicional da engenharia tem sido fortemente orientado para as técnicas convencionais de fabrico. Como resultado, muitos engenheiros não possuem o conhecimento e as competências necessárias para a conceção de peças em fabrico aditivo. Este desafio traduz-se em dois níveis:

- ***Lacunas de conhecimento:*** É fundamental que os engenheiros compreendam os princípios das várias técnicas de fabrico aditivo, incluindo o comportamento dos materiais, as capacidades das várias tecnologias e as limitações do processo.

- ***Design Mindset:*** Desenhar para FA requer uma mentalidade diferente em comparação com os métodos tradicionais. Os engenheiros devem pensar em termos de processos aditivos e considerar fatores como as estruturas de suporte e a orientação da construção para retirar capacidades das tecnologias aditivas. A própria liberdade geométrica e flexibilidade permitida pelas tecnologias de FA obriga os engenheiros a pensar de forma diferente para maximizar o seu potencial e desenvolver soluções que não seriam possíveis de produzir com métodos convencionais.



Para disseminar estas competências e enraizá-las nos engenheiros é essencial desenvolver programas educativos abrangentes e workshops de formação centrados especificamente nas tecnologias. As universidades e as organizações industriais devem colaborar para atualizar os currículos e proporcionar experiências práticas com as tecnologias de impressão 3D.

Redesenhar peças para AM não é uma tarefa simples, visto que implica repensar todo o projeto para aproveitar os pontos fortes, tais como a capacidade de produzir estruturas leves com geometrias complexas, otimizadas e customizadas. Os engenheiros devem garantir que as peças redesenhadas cumprem os requisitos de desempenho, o que pode ser um desafio dadas as diferentes propriedades mecânicas dos materiais em comparação com os

tradicionais. É essencial que sejam criadas competências e adotadas ferramentas e softwares avançados para design generativo e otimização de topologia, de modo a conseguir peças otimizadas para o processo produtivo. Estas ferramentas requerem conhecimentos e formação especializada para serem utilizadas de forma eficaz.

Para superar estes desafios e impulsionar a adoção pela indústria é essencial uma abordagem *top-down*. A adoção deve ser impulsionada por iniciativas estratégicas aos mais altos níveis das organizações, em vez de casos de estudo isolados de peças individuais muitas vezes vistos na literatura.

Os principais fatores críticos de sucesso para a adoção incluem:

- ***Compromisso da Liderança:*** A gestão de topo deve estar empenhada em integrar estas tecnologias na estratégia da empresa a médio e longo prazo. Isto inclui investir na tríade: tecnologia, formação e investigação.

- ***Colaboração multifuncional:*** A adoção bem-sucedida requer a colaboração entre vários departamentos, incluindo o design, a engenharia, a produção e a gestão da cadeia de abastecimento. Estas equipas multifuncionais podem ajudar a garantir que a tecnologia está perfeitamente integrada em todo o processo de desenvolvimento.

- ***Investimento em tecnologia:*** As empresas necessitam de investir nas mais recentes máquinas, materiais e ferramentas de software.

- ***Desenvolver conhecimentos especializados:*** É crucial internalizar conhecimento através da contratação de profissionais qualificados e da prestação de formação contínua aos colaboradores.

- ***Normalização:*** O estabelecimento de processos normalizados para projetar, testar e produzir peças vai ajudar a simplificar as operações e a garantir consistência de resultados.

- ***Garantia de Qualidade:*** A implementação de medidas robustas de garantia de qualidade é vital para promover a confiança nos processos e garantir que as peças cumprem os padrões e critérios de desempenho exigidos.

Em conclusão, a visão das fábricas do futuro alimentadas por tecnologias aditivas é simultaneamente estimulante e alcançável. No entanto, alcançar esta visão requer enfrentar desafios significativos na formação em engenharia e na capacitação interna das organizações.

Para colmatar a lacuna de conhecimento na formação em engenharia, as instituições de ensino superior devem atualizar os currículos para incluir princípios abrangentes de fabrico aditivo, experiência prática com tecnologias de impressão 3D e formação em ferramentas de software avançadas para design generativo e otimização de topologia. Além disso, devem ser implementados programas de desenvolvimento profissional contínuos nas empresas para garantir que os engenheiros atuais possam fazer uma transição suave para estas metodologias. Isto inclui fornecer acesso a workshops especializados, programas de certificação e sessões de formação prática.

Ao adotar uma abordagem *top-down* e integrar estas tecnologias nas principais iniciativas estratégicas, as empresas podem ultrapassar estes obstáculos e desbloquear todo o potencial desta tecnologia transformadora. Investir na formação e no desenvolvimento de uma força de trabalho qualificada será fundamental para alcançar a visão das fábricas do futuro orientadas para a produção aditiva. O futuro da produção é também aditivo e, com as metodologias e programas de formação adequados, está ao nosso alcance.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho é apoiado pela União Europeia no âmbito do Next Generation EU, através de uma subvenção do Acordo de Parceria do Plano de Recuperação e Resiliência (PRR) da República Portuguesa, no âmbito do projeto PRODUTECH R3 - "Agenda Mobilizadora da Fileira das Tecnologias de Produção para a Reindustrialização", visando a mobilização da indústria de tecnologias de produção para a reindustrialização do tecido industrial transformador (Projecto ref. nº 60 - C645808870-00000067).

CONTRAMOLDES DE TABLIER DE AUTOMÓVEL PRODUZIDO POR FABRICO ADITIVO

Henrique Brito[1], **Jorge Lino Alves**[2]

1 Mestrado em Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

2 INEGI, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

triais mais amplas, aproveitando a automação e a personalização oferecidas pela impressão 3D.A impressão 3D tem-se tornado cada vez mais popular no mercado devido à sua capacidade de produzir produtos únicos e personalizados sem a necessidade de ferramentas adicionais. A liberdade de design é provavelmente a maior vantagem desta tecnologia. Com a crescente preocupação com a sustentabilidade, o mercado procura cada vez mais materiais e processos alternativos aos tradicionais, que sejam mais sustentáveis. O setor de Fabrico Aditivo de Grande Formato (Large Format Additive Manufacturing - LFAM) destaca-se neste contexto, oferecendo várias vantagens e desafios. Com a utilização desta tecnologia surgem diversos problemas, como as grandes contrações dos materiais, zonas de acumulação de calor, saliências (overhangs), trajetórias de construção, entre outros [1-2]. Para resolver alguns destes problemas, o Design para Fabrico Aditivo (Design for Additive Manufacturing - DFAM) tem um papel fundamental [3]. Para além do design, também a escolha do material é crucial para garantir os requisitos das peças finais. A empresa Solidtech [4] levou a cabo um trabalho de investigação com a FEUP (Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto) que demonstrou a viabilidade da impressão de um "contramolde" de um tablier de um automóvel usando um braço robótico de 6 eixos com um extrusor acoplado. Esta abordagem destacou não apenas a flexibilidade e precisão da tecnologia LFAM, mas também abriu caminho para aplicações indus

CONTEXTO

Na produção de revestimentos/peles de painéis (*tabliers*) para a indústria automóvel é frequentemente utilizado uma ferramenta denominada "contramolde".

A sinterização por rotação ou *slush moulding* é o processo utilizado para produzir as peles de revestimento moldadas, sobretudo para quartelas e tabliers de automóveis. O processo envolve a rotação de um molde ferramenta em torno de um ou mais eixos, para que o plástico liquefeito por ação do aquecimento do molde, seja distribuído de maneira ideal e uniforme e forme uma camada homogénea (geralmente entre 1 e 1,2 milímetros de espessura).

Para realizar o processo de *slush moulding* é primeiro necessário produzir uma concha de níquel, que vai replicar todos os detalhes e texturas desta concha de níquel. Estas conchas nascem a partir da eletrodeposição de níquel nos denominados modelos de banho [5-6]. Em Portugal estas conchas sao produzidas na Moldtech [7] (Figura 1).

Concha de níquel



Pele de revestimento do tablier

FIGURA 1
Concha de níquel usada para produzir as peles [5].

Na Solidtech o processo inicia-se quando o ficheiro CAD do molde do *tablier* (mother model) é recebido. A partir daqui é feito um trabalho de modelação 3D, que consiste em fazer um *offset* da superfície do *tablier* para criar a superfície do contramolde. Este offset é crucial pois vai assegurar o espaço (espessura) necessário para vazar uma camada uniforme de silicone. A função deste silicone, sendo flexível, é permitir desmoldar o modelo de banho do contramolde (Figura 2).

O processo completo de produção das peles dos *tabliers* é extenso e complexo. A parte do processo no qual a Solidtech está envolvida vai apenas até aos modelos de banho.

Atualmente é já usada a impressão de grande formato (LFAM) para produzir a estrutura que suporta os modelos de banho [6]. Estes modelos são basicamente superfícies de *tablier* de sacrifício e servem apenas para dar forma à concha de níquel. Para retirar as conchas intactas é necessário destruir os modelos de banho.

DESENVOLVIMENTO

O processo utilizado até hoje pela Solidtech para construir os contramoldes consiste em maquinar um bloco de dimensões 2120x700x610 mm³, construído a partir de uma série de pequenos blocos à base de poliuretano, SikaBlock M330.
Após maquinado, é necessário o contramolde ser acabado à mão com massas e vários primários de forma a tapar os poros existentes, assegurando uma superfície final lisa e consistente.

O trabalho recente desenvolvido pela Solidtech visa substituir o processo tradicional, subtrativo, por um processo aditivo, de forma a diminuir o desperdício, custos e tempo de fabricar o contramolde de um *tablier.*

Para isso, foi utilizado neste trabalho um sistema de impressão 3D de grandes dimensões comercializado pela Caracol, que consiste num braço robótico da Kuka (Figura 3) com extrusor de *pellets* acoplado. O sistema utiliza ainda uma placa de MDF como plataforma de construção e um silo da Piovan para desumidificar o material a extrudir. A desumidificação é crucial para garantir boa adesão entre camadas e homogeneidade no material a extrudir.

O trabalho desenvolvido foi um processo contínuo de melhoria no design da peça e parâmetros de impressão, de forma a conseguir conciliar as soluções de impressão com a funcionalidade da peça.

O Design para Fabrico Aditivo foi aqui aplicado de forma a criar um percurso fechado, que começa e acaba no mesmo local, facilitando depois as operações com o software de slicing (divisão do objeto em camadas). Para criar essas trajetórias foi necessário conceber uma linha



FIGURA 2
Etapas de produção do modelo de banho [5].

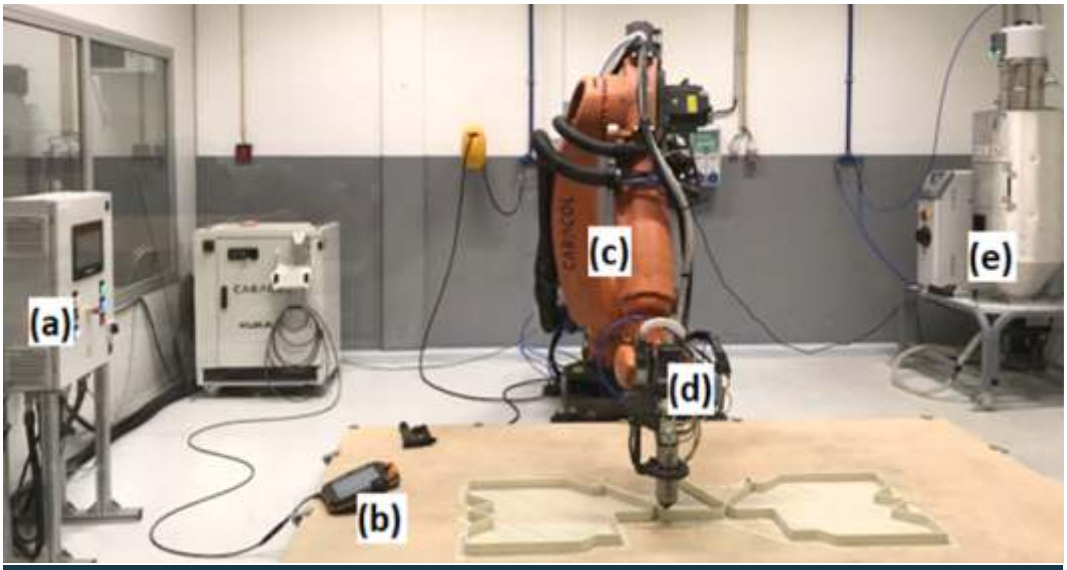


FIGURA 3
Equipamento de sala de impressão: (a) Controlador do extrusor; (b) Controlador do braço robótico; (c) Braço robótico; (d) Cabeça extrusora; (e) Silo [8].

dupla de forma a "fechar" o percurso e reforçar as zonas mais críticas [8].

O primeiro passo consistiu em fazer um *offset* de 5.9 mm da superfície do contramolde já existente (Figura 4). Sem esta segunda superfície o robot começava a acabava cada fatia em pontos opostos, o que não é ideal neste tipo de tecnologia. Além disso, esta segunda superfície do contra-molde vai assegurar uma espessura maior, assegurando uma maior rigidez e integridade estrutural.

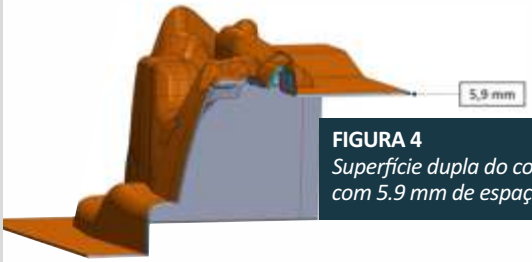


FIGURA 4
Superfície dupla do contramolde com 5.9 mm de espaçamento [5].

De seguida for criada uma estrutura de suporte do contramolde e unida à superfície do mesmo. A estrutura foi desenhada com ângulos de superfície favoráveis para uma impressão a 45° (Figura 5). Esta estrutura tem uma função crucial pois não só assegura rigidez do contramolde, mas também vai ajudar a manusear a deslocação do mesmo (com empilhador por exemplo).

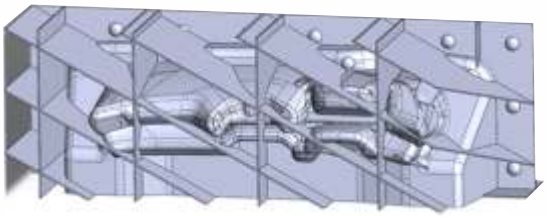


FIGURA 5
Contramolde final modelado [5].

De seguida foi estudado a melhor orientação e parâmetros para imprimir o contramolde. Aqui tentou-se minimizar os *overhangs* e *travels* (linhas a vermelho na Figura 6) realizados pelo robot.



FIGURA 6
Contramolde a ser "fatiado" no software de slicing [5].

Após várias simulações, com diferentes orientações e ângulos de impressão, concluiu-se que a posição horizontal, a começar do lado do volante, com um angulo de *slicing* de 45° seria a melhor hipótese.

No que concerne ao material do contramolde, o polipropileno com 30% fibra de vidro (PP30GF) acabou por ser o material escolhido para este projeto por ser um material que funciona bem neste tipo de equipamento, com um custo baixo e boas propriedades mecânicas. Além do mais é compatível com o processo de corte e lixagem, e produtos usados no acabamento do contramolde (massa de polyester e resina epoxídica). Embora existam outros materiais com propriedades mecânicas até melhores que o PP30GF, o preço dos mesmos é mais elevado, e ao contrário deste, não se sabe se aprovariam neste equipamento de extrusão.

Tendo nesta fase o material, ficheiro e parâme-

tros de impressão estabelecidos, passou-se para a impressão do contramolde. Esta fase foi um processo iterativo e ainda demorado, que envol veu a impressão de vários testes até à peça final.



FIGURA 7
Defeitos presentes nos primeiros testes: (a) Superfície vertical deformada; (b) Empeno na base [5].

Para corrigir estes e outros defeitos presentes, a velocidade inicial foi adaptada para os tempos de fatia mais curtos, bem como a própria geometria do contramolde, de forma a minimizar os empenos que ocorreram nos primeiros testes.

Após várias tentativas chegou-se ao resultado pretendido, apresentado na Figura 8.

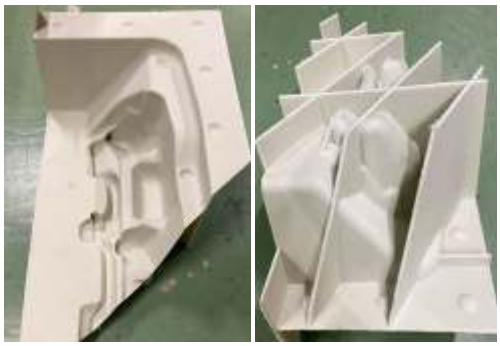


FIGURA 8
Impressão final do contramolde [5].

Como o contramolde ainda teria de passar pela fase de acabamento, optou-se por imprimir apenas metade do mesmo de forma a reduzir os custos de material e tempo de acabamento. Além disso para o teste em questão 50% do contramolde é suficiente.

Por último passou-se à fase importante do acabamento, que consistiu em aplicar manualmente à parte interior do contramolde massas de enchimento, seguido por um extenso trabalho de lixagem e aplicação de primário, de forma a criar uma superfície lisa e uniforme [5]. A Figura 9 demonstra o resultado final desse processo.



FIGURA 9
Superficie final acabada já sem defeitos [5].

CONCLUSÕES

O estudo realizado permitiu concluir que é possível produzir um contramolde por processos aditivos em vez de subtrativos, resultando em várias vantagens, nomeadamente a redução de custos e tempo de produção (menos 5 dias que o convencional).

Conclui-se também que este processo resulta melhor em certos contramoldes do que outros, dependendo da complexidade da geometria do *tablier*. Ao invés da maquinagem, cujo tempo de acabamento apenas vai variar consoante a dimensão do contramolde, no caso da impressão este tempo de acabamento pode ser maior para geometrias mais complexas (onde irão ocorrer mais defeitos). Por esta mesma razão foi escolhida uma geometria complexa para este estudo, de forma a se poder analisar um dos piores cenários. Contudo, o processo conseguiu ser mais eficiente que o convencional.

Relativamente aos custos, o facto de o PP30GF custar uma fração do que custa o Sikablock M330, juntamente com a facto da impressão ser significativamente mais barata que a maquinagem, faz com que o custo total de produção aditivo seja menos de metade do subtrativo.

Por último, aliado a estas vantagens, resulta ainda um processo mais sustentável a nível de produção (menos desperdício) e logística, uma vez que a Solidtech pode fazer a impressão dentro de portas, mas não a maquinagem.

REFERÊNCIAS

[1] Ian Gibson, David Rosen, Brent Stucker, and Mahyar Khorasani, Additive Manufacturing Technologies, 3rd Ed., Springer, 2021.

[2] Carlos Vicente, Manuel Sardinha, Luis Reis, Marco Leite, *"Large-Format Additive Manufacturing of Polymer Extrusion-Based Deposition Systems: Review and Applications"*, Progress in Additive Manufacturing, https://doi.org/10.1007/s40964-023-00397-9, 2023

[3] Daniel Moreno Nieto, Daniel Moreno Sánchez, *"Design for Additive Manufacturing: Tool Review and a Case Study"*, Applied Sciences, 11, 157, 2021

[4] https://www.solidtechonline.com/, acedido a 28 de maio de 2024

[5] Felgueiras, Afonso. *"Manufacturing a counter mould by Large Format Additive Manufacturing"*, Tese de Mestrado, FEUP, fevereiro de 2024. https://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/157770

[6] Uchtmann, Hermann, and Ingomar Kelbassa. *"CAX Process Chain for Laser Drilling of Tool Molds."* International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics, 2013. https://doi.org/10.2351/1.5062873.

[7] https://www.mold-tech.com/soft-trim-tooling/, acedido a 12 de junho 2024

[8] Brito, Henrique. "*Design for Large-Scale Additive Manufacturing*," Tese de Mestrado, FEUP, setembro de 2023. https://repositorioaberto.up.pt/bitstream/10216/153505/2/646982.pdf.

FABRICO HÍBRIDO COMO POTENCIADOR DE EFICIÊNCIA E INOVAÇÃO EM FERRAMENTAS DE CORTE PARA A INDÚSTRIA AUTOMÓVEL

Francisco Matos[1], João Marouvo[2], Tiago E.F. Silva[1,3], Bruno Guimarães[2], Daniel Figueiredo[2], Abílio M.P. de Jesus[1,3], Ana Reis[1,3]

1 INEGI, Institute of Science and Innovation in Mechanical and Industrial Engineering Address, R. Dr. Roberto Frias 400, 4200-465 Porto, Portugal
2 Palbit S.A., P.O. Box 4, 3854-908 Branca, Portugal
3 DEMec, Department of Mechanical Engineering, University of Porto, R. Dr. Roberto Frias s/n, 4200-465 Porto, Portugal

O uso de processos de fabrico aditivo na indústria tem aumentado significativamente pois permite ultrapassar os limites dos processos de fabrico tradicionais, ao oferecer maior liberdade de design e abrir novas possibilidades em várias áreas, incluindo no fabrico de ferramentas de corte. O preço por objeto produzido de forma aditiva é, geralmente, independente da sua complexidade geométrica, o que serve de suporte para o uso do fabrico aditivo na produção de ferramentas de corte, particularmente quando pequenas séries de elevado valor acrescentado permitem responder às necessidades da indústria, especialmente no setor automóvel. A indústria automóvel depara-se diariamente com desafios ao navegar por novas tendências de design e desenvolvimentos tecnológicos, o que leva ao rápido desenvolvimento de novos modelos. Relativamente ao setor das ferramentas de corte, o fabrico aditivo possibilita a produção eficiente de formas e características que não são possíveis através de processos subtrativos convencionais. A ferramenta de fresagem desenvolvida incorpora canais conformais internos, um número elevado de dentes (relativamente ao tamanho da ferramenta) e um corpo oco intercambiável. O uso de pastilhas de PCD (Diamante Policristalino) brasadas (após fabrico aditivo), em conjunto com condições tribológicas aprimoradas na zona de corte (melhor arrefecimento e lubrificação da aresta de corte) e um elevado número de dentes, promove condições ideais de corte, prolongando assim a vida útil da ferramenta. A notável vida útil da classe de PCD na maquinagem de ligas alumínio torna-o a escolha ideal como material para a zona de corte ativa, fazendo com que esta ferramenta seja relevante para indústria automóvel onde a redução de peso é fundamental, e dita o uso da classe de materiais não ferrosos como são as ligas de alumínio. O futuro desenvolvimento da indústria automóvel centrar-se-á na otimização da eficiência dos veículos com ênfase na motorização elétrica e armazenamento de energia. Neste contexto, não apenas as ligas de alumínio, mas também as tecnologias de fabrico, terão, num futuro muito próximo, de enfrentar e superar uma série de desafios emergentes. Este artigo explora o desenvolvimento, produção e validação experimental de uma ferramenta de fresagem com geometria complexa com o objetivo de atingir uma eficiência de maquinagem aprimorada.

PALAVRAS CHAVE
FABRICO HÍBRIDO; FLUIDO DE CORTE; CANAIS CONFORMAIS; FRESAGEM A ALTA VELOCIDADE

1. INTRODUÇÃO

Os processos de fabrico aditivo destacam-se pela eficiência na utilização de recursos e pela capacidade em produzir peças com geometrias complexas. Os métodos avançados de fabrico, como a fusão a laser em cama de pó (LPBF), permitem a criação de componentes que, de outra forma, exigiriam prolongadas e complexas etapas de maquinagem. Com a adoção do fabrico aditivo, a indústria beneficia não só da redução de desperdício de recursos, mas também de maior flexibilidade para conceber e produzir peças intrincadas de forma mais eficiente [1].

A indústria automóvel destaca-se pela sua competitividade e constante evolução, sendo por isso primordial o aumento da eficiência e durabilidade dos processos de fabrico. O aumento do uso de peças em ligas alumínio no setor automóvel faz com que a cadeia de abastecimento enfrente o desafio de oferecer operações de maquinagem mais produtivas. Um estudo recente revelou que a quantidade média de alumínio utilizada nos carros europeus aumentou 18%, passando de 174 kg em 2019 para 205 kg em 2022. A previsão aponta para que esta tendência continue, com o teor médio de alumínio a aumentar destes 205 kg para 237 kg até 2026 (+15,6%) e 256 kg por veículo até 2030 (+24,9%) [2]. Nas últimas décadas, a maquinagem a alta velocidade (HSM) surgiu como uma das tecnologias mais promissoras, ao permitir o aumento de produtividade sem repercussões excessivas na qualidade das peças [3].

O fabrico aditivo apresenta-se como solução para o aumento do potencial das ferramentas de corte ao permitir maior liberdade no design e fabrico de ferramentas, particularmente em ferramentas que incorporam canais de internos de lubrificação. A liberdade de design dos canais de refrigeração é, geralmente, limitada pelos métodos de fabrico convencionais, sendo comummente necessário recorrer a demoradas operações de furação ao longo do corpo da ferramenta. O fornecimento do fluido de corte de forma direcionada e otimizada é essencial na maquinagem de metais, dado que esta é caracterizada pela geração de altas temperaturas na zona de interface entre a ferramenta e a apara, o que promove o desgaste e a rápida deterioração das ferramentas de corte. Os canais internos permitem fornecer lubrificante direcionado à zona de corte, originando uma melhoria nas condições tribológicas do corte, e promovem um arrefecimento comprovadamente mais eficiente do que o arrefecimento convencional [4], [5], [6]. O lubrificante direcionado para a zona de corte atua como um mecanismo de quebra de apara e favorece a sua remoção ao diminuir o comprimento e tempo de contato entre a ferramenta de corte e o material, originando uma redução nas forças de corte e na temperatura, bem como a melhoria do controlo da apara. Os processos de fabrico aditivo surgem como solução ao desbloquearem maior liberdade de design de formas internas complexas, o que leva à melhoria significativa do fluxo de fluido e ao seu fornecimento direcionado para a aresta de corte. A capacidade de fabricar peças complexas num único equipamento e operação faz com que a indústria estabeleça o fabrico aditivo como uma técnica certificada para o fabrico de produtos. Apesar da impressão 3D não ser necessariamente mais rápida que os processos de fabrico convencionais, esta reduz o número de máquinas e processos requeridos, uma vez que as ferramentas de corte maquinadas convencionalmente requerem múltiplas operações subtrativas, como o torneamento, a fresagem ou a retificação. O pós-processamento das ferramentas produzidas de forma aditiva limita-se à retificação para garantir o ajuste com o suporte da fresa, à brasagem das pastilhas no corpo da ferramenta, seguida pelo afiamento (geralmente através de tecnologias laser) e calibração e das arestas de corte (etapas comuns tanto no fabrico aditivo quanto no fabrico subtrativo de ferramentas de corte).

A viabilidade do uso da tecnologia LPBF para o fabrico de uma ferramenta de fresagem compacta e de geometria complexa foi explorada neste trabalho. Pretende-se desenvolver uma ferramenta de fresagem incorporando um elevado número de dentes em PCD e canais de refrigeração conformais. Para validar a geometria e a eficácia dos canais de refrigeração em direcionar o fluido para a zona de corte, foram realizadas simulações preliminares de dinâmica de fluidos computacional (CFD). Após a impressão da ferramenta foram realizados ensaios experimentais de maquinagem com o objetivo de avaliar o desempenho da fresa desenvolvida e comparar a performance da solução desenvolvida com soluções já disponíveis no mercado. Durante os ensaios foi efetuado a aquisição e registo de forças de corte, desgaste e rugosidade superficial da peça maquinada.

2. DESENVOLVIMENTO DA FRESA

2.1 DESIGN

A liberdade concedida pelo fabrico aditivo permite uma nova abordagem durante projeto de ferramentas de corte. A capacidade de explorar designs mais complexos, aliada à capacidade de simular o comportamento dos fluidos durante a operação permite otimizar a funcionalidade das ferramentas. Torna-se possível produzir e disponibilizar ferramentas mais eficientes e duradouras, contribuindo significativamente para a melhoria global no setor da produção de ferramentas de corte.

Foi projetada uma ferramenta de fresagem, presente na Figura 1, em que se destacam os canais internos de refrigeração, que permitem direcionar o lubrificante para a zona efetiva de corte, um elevado número de dentes em relação ao tamanho da ferramenta e um corpo intercambiável. Esta ferramenta, obtida por fabrico híbrido (aditivo e subtrativo) possui aproximadamente 14 mm de altura e 50 mm de diâmetro. A

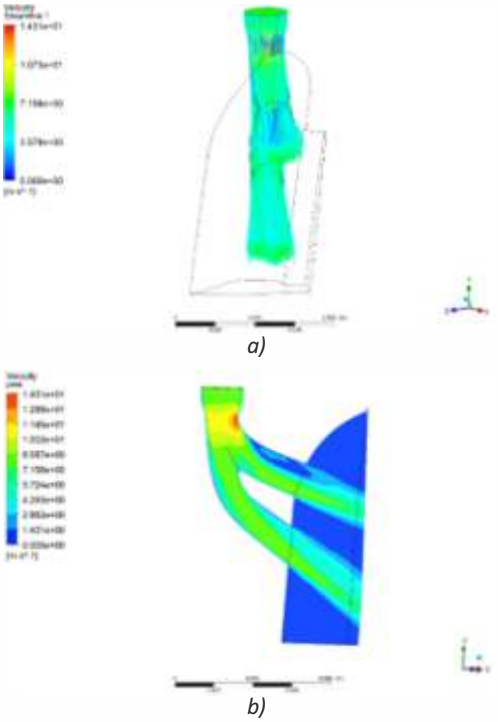
ferramenta desenvolvida possui 12 dentes, um número que excede significativamente o habitual das fresas convencionalmente fabricadas com dimensões semelhantes, uma vez que estas geralmente possuem entre 4 a 6 dentes. Cada dente incorpora um *slot* destinado à brasagem de uma pastilha de corte de PCD, pós-fabrico aditivo. O PCD foi selecionado como material de corte devido à sua extraordinária durabilidade duran-te a maquinagem de alumínio, de forma a garantir que esta ferramenta teria uma vida útil prolongada. A entrada do fluido de corte, para cada dente, é realizada através de um canal com que no interior do corpo da fresa, se divide com o objetivo de direcionar eficazmente o fluido de corte para a zona de corte da pastilha.



FIGURA 1
Modelo CAD tridimensional da ferramenta de fresagem desenvolvida.

Como discutido anteriormente, os canais de refrigeração presentes em fresas tradicionais são geralmente fabricados de forma convencional, frequentemente resultando em canais com arestas e curvas pronunciadas, o que afeta negativamente o fluxo do fluido de corte. As mudanças abruptas na direção dos canais foram minimizadas, de forma a evitar geometrias de cotovelo, dado que estas são suscetíveis a impactar negativamente o controlo e a distribuição do fluxo de fluido de lubrificação. Além disso, o aumento do raio de curvatura dos canais internos leva a que o fluxo de lubrificante seja mais rápido e uniforme [5]. A simulação CFD foi utilizada para investigar o fluxo de lubrificante no interior da ferramenta e a interação do fluido com a zona de corte, com o objetivo de validar que o lubrificante é direcionado eficientemente para a zona de corte.

Com a simulação da distribuição do perfil de velocidade do fluido no interior do canal foi possível validar e identificar zonas críticas na geometria do canal. Apesar da interação geométrica com o intuito de otimizar os canais, a simulação revelou que o fluido de corte tem maior tendência a fluir pelo canal inferior, visível na Figura 2. Idealmente o fluido seria distribuído uniformemente entre os dois canais, porém é evidente que, devido ao design, o fluido encontra menor resistência ao sair pelo canal inferior, pois segue um caminho mais direto e evita a mudança de direção observada no canal superior. Apesar disso, não se revelou viável a criação de entradas de fluido distintas para o canal superior e inferior de cada dente, devido ao tamanho relativamente pequeno da ferramenta. Pode-se observar claramente que as geometrias projetadas e a localização de saída dos canais de refrigeração resultam num fluxo de lubrificante concentrado, direcionado para a zona ativa de corte.



a)

b)

FIGURA 2
Distribuição da velocidade do fluido de corte: a) vista frontal; b) vista em corte.

2.2 FABRICO ADITIVO

Após a validação do design foi iniciado o processo de impressão, com a primeira etapa a ser o pré-processamento onde a escala, layout, posição e orientação da peça foram definidos. A ferramenta desenvolvida foi impressa com recurso a um sistema LPBF com uma câmara de construção com 245 x 245 x 350 mm, visível na Figura 3. A impressão foi realizada em atmosfera inerte (azoto) com uma espessura da camada depositada de 30 µm. O material escolhido para a produção dos protótipos foi o aço *maraging* AISI 18Ni300, devido ao seu equilíbrio entre durabilidade e facilidade de impressão. Esta liga oferece moderada resistência à corrosão, excelente tenacidade e resistência mecânica, e facilidade em ser processada por LPBF. Os principais parâmetros de produção, nomeada-

mente, a potência, velocidade do laser e diâmetro do spot laser foram respetivamente 295 W, 950 mm/s e 175 µm. A impressão de dez protótipos de ferramentas demorou cerca de 30 horas e decorreu com sucesso.



FIGURA 3
GE Additive Concept Laser M2 Series 5 - INEGI.

3. RESULTADOS

3.1 AVALIAÇÃO DA FERRAMENTA

Na Figura 4 é apresentado o corpo da ferramenta produzida por fabrico aditivo, bem como uma imagem deste instalado no suporte, este último produzido de forma convencional. A inspeção visual exterior não revelou defeitos de fabrico que colocassem em causa o funcionamento da ferramenta. Para além disso, a análise destrutiva de uma fresa permitiu avaliar os canais internos, que se revelaram desobstruídos e com a geometria expectável, visível na Figura 4-a). Foi efetuada a medição da dureza superficial tendo sido obtida uma dureza de 55 HRC. A rugosidade média superficial externa foi de Ra=7.11 µm. A qualidade superficial e dimensional do slot destinado às pastilhas de corte permitiu que estas fossem brasadas sem a necessidade de etapas adicionais de maquinagem, o que permitiu reduzir o tempo de produção da ferramenta. A superfície superior do corpo da ferramenta (que contacta com o suporte da ferramenta) foi submetida a etapas de pós-processamento (maquinagem e retificação) para remover estruturas de suporte, garantir o alinhamento com o suporte da ferramenta e evitar fugas de fluido na interface.

Relativamente à eficácia dos canais internos no direcionamento do fluido de corte, os resultados da simulação correlacionaram-se com os resultados experimentais, visíveis na Figura 5, confirmando que o fluido é direcionado com sucesso para as zonas de corte, assegurando uma boa lubrificação na interface entre a ferramenta e a apara. Além disso, o fluido que sai pelo canal inferior apresenta um fluxo mais concentrado, enquanto o canal superior demonstra maior dispersão do fluido.

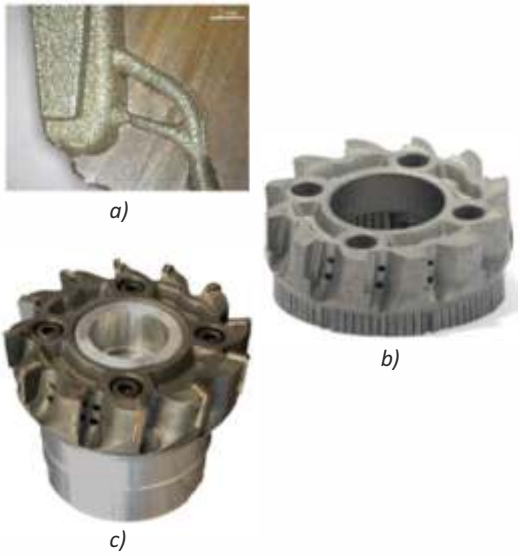


FIGURA 4
a) Interior de um canal de lubrificação
b) Corpo da ferramenta de fresagem com suportes originários do processo de fabrico;
c) Corpo da ferramenta montado no suporte;.

3.2 AVALIAÇÃO FUNCIONAL

3.2.1 MATERIAIS E MÉTODOS

A ferramenta desenvolvida foi sujeita a ensaios experimentais, com aquisição de forças e rugosidade bem como uma análise à tendência de desgaste das pastilhas de corte para validação do desempenho em operações de fresagem. Adicionalmente foram testadas duas fresas convencionais, com dimensões semelhantes (Ø40), representativas da solução utilizada em meio industrial, de forma a fornecerem valores de referência que permitissem a avaliação e comparação do desempenho da fresa desenvolvida. A rugosidade servirá como parâmetro de avaliação do acabamento superficial. Na Figura 6 são apresentadas as três ferramentas de fresagem testadas. Todas as fresas possuem pastilhas de corte de PCD com igual preparação da aresta de corte. A fresa produzida por fabrico aditivo destaca-se pela

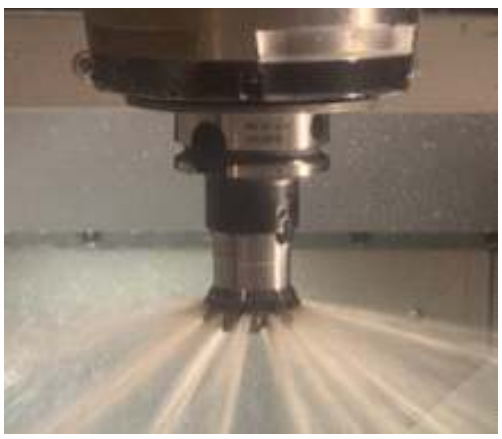


FIGURA 5
Ferramenta com a lubrificação ativa.

maior densidade de dentes de corte (12 dentes) e por exibir canais de refrigeração conformais. Foi escolhida uma liga de alumínio da série 6000 para os ensaios, dado que estas ferramentas pretendem oferecer operações de maquinagem mais produtivas neste material, tendo em consideração o aumento do uso de peças fabricadas em alumínio no setor automóvel.



FIGURA 6
(a) fresa AM (12 dentes), b) fresa CV1 (6 dentes), c) fresa CV2 (4 dentes).

Os parâmetros de corte selecionados para os ensaios de fresagem encontram-se resumidos na Tabela 1. Considerando que o avanço foi definido sob a forma de avanço por dente é importante considerar que para o mesmo conjunto de parâmetros a nova fresa desenvolvida duplica e triplica a velocidade de avanço linear da fresa CV1 e CV2, respetivamente. Este é um ponto de partida particularmente interessante pois permite aumentar a produtividade, mantendo constante o avanço por dente, parâmetro intrinsecamente ligado ao acabamento superficial. Cada combinação de parâmetros foi testada três vezes, sendo calculada a média das forças e da rugosidade média (Ra) obtida durante os ensaios. A medição das forças de corte foi realizada através de um dinamómetro piezoelétrico Kistler® (tipo 9257B), um amplificador de carga Kistler® (tipo 5070) e um sistema de aquisição de dados (Kistler® 5697A). Foram efetuadas medições de rugosidade superficial média (R_a) com o rugosímetro portátil Mitutoyo® (SJ-210).

TABELA 1
Parâmetros de corte ensaiados

n (rpm)	8000 / 16000
vc (m/min)	1004 / 2008
ap (mm)	1
fz (mm/dente)	0.05 / 0.10 / 0.15

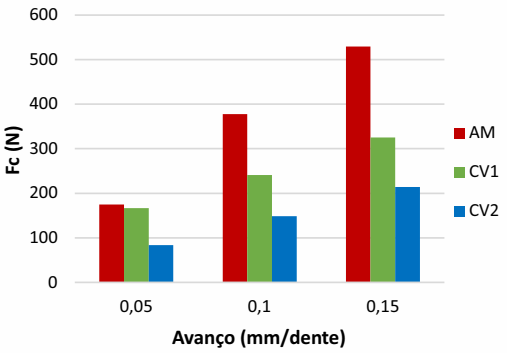
3.2.2 RESULTADOS

Os resultados da força de corte média em função do avanço por dente, para as duas velocidades de rotação testadas encontram-se resumidos na Figura 7. Os ensaios experimentais permitiram constatar que a força de corte aparenta ser pouco sensível ao aumento da velocidade de corte e consequente aumento da velocidade de rotação da fresa. Por outro lado, o incremento do avanço por dente refletiu-se no aumento da força de corte, em todas as fresas testadas, um comportamento espectável e em linha com a literatura [7]. O incremento da força de corte com o aumento do avanço, é originada pelo aumento do volume de apara não deformada.

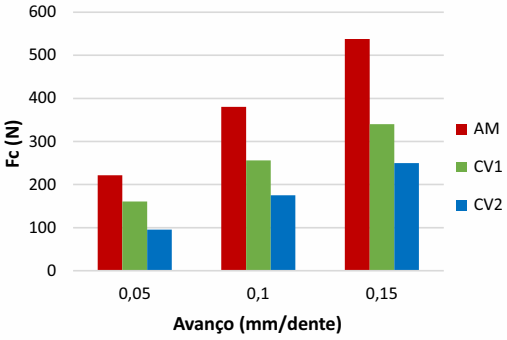
Adicionalmente, optou-se por apresentar os resultados da força de corte sob a forma do quociente entre a força de corte obtida pela fresa desenvolvida (AM) e as fresas convencionais (CV1 e CV2). A relação das forças no plano de corte (Fc) em função do avanço por dente, encontra-se resumida na Figura 8, para cada fresa e para cada velocidade de rotação. A análise da Figura 8 permite verificar que face à fresa CV1, a fresa AM duplica o avanço linear, apesar da força de corte apenas aumentar cerca de 1.5 vezes. Quando comparada com a fresa CV2, a fresa AM permite triplicar o avanço linear, originando um aumento de 2.8 vezes na força de corte. As forças de corte, para os mesmos parâmetros de maquinagem, foram consistentemente superiores na fresa com maior número de dentes, no entanto o incremento destas foi sempre percentualmente inferior ao aumento do avanço linear (diretamente ligado à produtividade).

A qualidade superficial e a precisão dimensional são essenciais para garantir a conformidade da peça com as especificações técnicas, especialmente em setores altamente competitivos, como o setor automóvel. Na Figura 9 é exibida a rugosidade média (Ra) em função do avanço por dente, para cada fresa e velocidade de rotação. Apesar das rugosidades obtidas com a fresa AM e a fresa CV1 serem semelhantes, com o incrementar do avanço por dente, a fresa AM apresenta uma evolução mais favorável da rugosidade, isto é uma menor tendência do aumento da mesma. Os resultados obtidos comprovam que a fresa desenvolvida oferece resultados excecionais com parâmetros de corte mais produtivos, geralmente caracterizados por condições tribológicas que afetam negativamente as ferramentas, não prejudicando excessivamente o acabamento superficial.

Embora o aumento da produtividade seja



a)



b)

FIGURA 7
Força de corte média em função do avanço para um ap de 1mm: a) vc= 1000 m/min, b) vc= 2000 m/min.

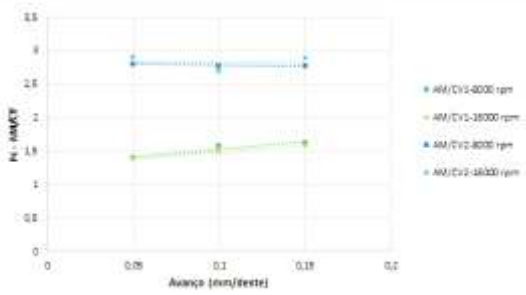


FIGURA 8
Relação força de corte entre a fresa AM e as fresas convencionais (CV1 e CV2).

essencial na otimização de processos de corte por arranque da apara, o equilíbrio entre a qualidade superficial e a produtividade é de extrema importância. Um foco excessivo na produtividade em detrimento da rugosidade superficial pode afetar negativamente as características finais da peça. Por outro lado, o foco excessivo em obter superfícies com baixa rugosidade e alta qualidade superficial pode originar operações de maquinagem prolongadas e impactar a eficiência global do processo. Assim, torna-se necessário encontrar um equilíbrio adequado entre rugosidade e produtividade para assegurar não apenas a eficiência produtiva, mas também a produção de peças com as características superficiais desejadas. A Figura 10 exibe a rugosidade superficial média (R-a) em função da taxa de remoção de matérial,

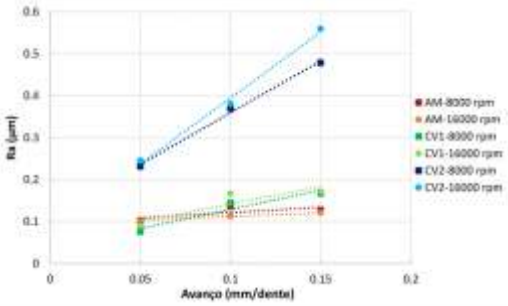


FIGURA 9
Rugosidade superficial (Ra) em função do avanço, para cada fresa e velocidade de rotação.

para cada fresa, sendo percetível os resultados excecionais obtidos pela ferramenta desenvolvida. A ferramenta desenvolvida oferece um aumento de produtividade, simultaneamente permitindo que a rugosidade superficial supere de forma consistente a rugosidade obtida com as ferramentas tradicionais. A ferramenta desenvolvida proporcionou excelente qualidade e desempenho desde o primeiro teste, permitindo alcançar uma redução de 50% e 66% no tempo de maquinagem, face à fresa CV1 e CV2 respetivamente. O elevado número de dentes (relativo ao tamanho da fresa) em conjunto com o fluido lubrificante eficazmente direcionado para a zona de corte aparenta oferecer condições tribológicas de corte ideais (ou perto) promovendo menor desgaste das pastilhas de corte e maior qualidade superficial. Para além disso, a fresa desenvolvida oferece melhor eficiência no corte e maior precisão devido à ausência de operações de montagem de pastilhas indexáveis, resultado na menor probabilidade de perda da calibração (*runout*) em operação e/ou manipulação.

Ao longo dos ensaios, nas três ferramentas testadas, as tendências de desgaste foram normais, e não tendo sido promovidos comprimentos de corte suficientes (<15m) que possibilitem uma análise completa neste domínio. As pastilhas de PCD oferecem elevada resistência ao desgaste permitindo que a

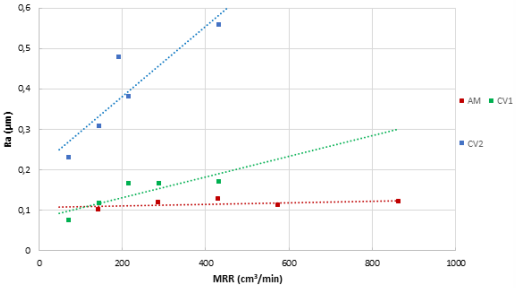


FIGURA 10
Rugosidade média (Ra) em função da taxa de remoção de material, para cada fresa.

ferramenta possua uma vida útil prolongada e sendo o PCD um material comum na indústria das ferramentas de corte, facilmente disponível para os fabricantes, aparenta ser a solução perfeita para operações de acabamento e semi-acabamento de ligas de alumínio.

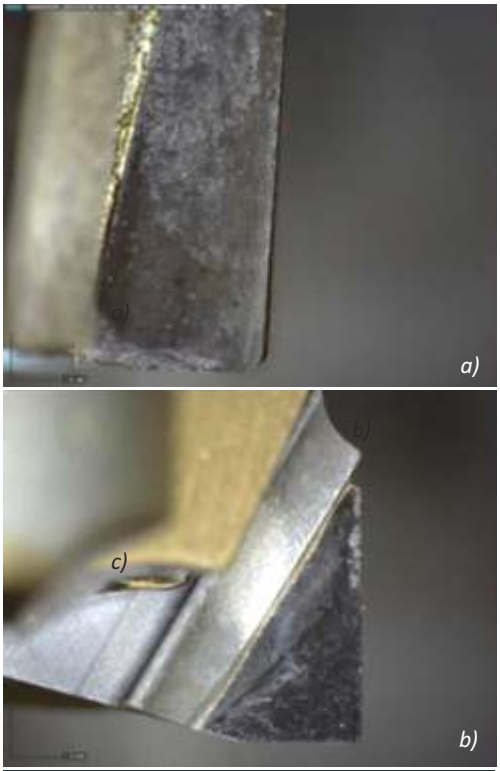


FIGURA 11
Aspeto geral das pastilhas de corte após ensaios: a) fresa AM; b) fresa CV1

4. CONCLUSÕES

A produção de uma ferramenta de fresagem com geometria intrincada e complexa, com canais internos de pequeno diâmetro conformais e elevado número de dentes, revelou-se viável através de um processo de fabrico híbrido. O corpo da ferramenta de corte apresenta um número significativo de dentes de corte, o que o torna excecionalmente desafiante de produzir através processos de fabrico convencionais. O fabrico aditivo permitiu a produção da ferramenta de forma híbrida, com o corpo de geometria complexa a ser produzido através da tecnologia LPBF e o suporte de forma convencional, minimizando o tempo e recursos gastos em operações de maquinagem.

Os ensaios de validação e *benchmarking* da solução de construção híbrida proposta evidenciaram de forma consistente e estável que esta solução oferece simultaneamente ganhos de produtividade e qualidade superficial. A abordagem híbrida demonstrou-se eficaz em alcançar melhores resultados de forma consistente, destacando-se como uma solução promissora para aplicações industriais onde a qualidade do acabamento superficial é crucial aliada a elevada produtividade.

AGRADECIMENTOS

Agradece-se o apoio das Agendas Mobilizadoras para a Inovação Empresarial (AVISO AAC n.º 02/C05-i01/2022), em particular o projeto Hi-rEV - Recuperação do Setor de Componentes Automóveis (C644864375-00000002 - Projeto n.º 64).

REFERÊNCIAS

[1] T. Pereira, J. V Kennedy, and J. Potgieter, "A comparison of traditional manufacturing vs additive manufacturing, the best method for the job," *Procedia Manuf*, vol. 30, pp. 11-18, 2019, doi: https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.02.003.

[2] "Aluminum Content in Passenger Vehicles (Europe)," Apr. 2023.

[3] J.-D. Kim and Y.-H. Kang, "High-spend machining of aluminium using diamond endmills," *Int J Mach Tools Manuf*, vol. 37, no. 8, pp. 1155-1165, 1997, doi: https://doi.org/10.1016/S0890-6955(96)00011-9.

[4] C. Zachert, H. Liu, T. Lakner, D. Schraknepper, and T. Bergs, "CFD simulation to optimize the internal coolant channels of an additively manufactured milling tool," *Procedia CIRP*, vol. 102, pp. 234-239, 2021, doi: https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.09.040.

[5] T. Lakner, T. Bergs, and B. Döbbeler, "Additively manufactured milling tool with focused cutting fluid supply," *Procedia CIRP*, vol. 81, pp. 464-469, 2019, doi: https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.03.118.

[6] M. Rahman, A. S. Kumar, and M. R. Choudhury, "Identification of Effective Zones for High Pressure Coolant in Milling," *CIRP Annals*, vol. 49, no. 1, pp. 47-52, 2000, doi: https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)62893-5.

[7] D. Xu, P. Feng, W. Li, Y. Ma, and B. Liu, "Research on chip formation parameters of aluminum alloy 6061-T6 based on high-speed orthogonal cutting model," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 72, pp. 955-962, May 2014, doi: 10.1007/s00170-014-5700-3.

FABRICO ADITIVO POR EXTRUSÃO: ESTIMATIVA DA RIGIDEZ DE UM EQUIPAMENTO CUSTOMIZADO COM CABEÇOTE MONOROSCA

DML Silva[1*], LF Caldeira[1], JL Alves[2], ZC Silveira[1]

1 Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Engenharia Mecânica, 13566590, BR.
2 INEGI, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Departamento de Engenharia Mecânica, 4200465, PT.
* davilamlopes@usp.br

Este artigo apresenta o modelo geométrico computacional da solução técnica proposta para um equipamento customizado para fabricação aditiva direta por extrusão com monorosca. O equipamento foi concebido em conceito modular a partir de cinco principais subsistemas: subsistema de bombeamento e plastificação; subsistema de acionamento; subsistema de alimentação da matéria-prima em pó; subsistema de movimentação cartesiana nos eixos X, Y e Z; e subsistema de monitoramento de temperatura e pressão. Para a estimativa da rigidez do equipamento, foram realizadas análises numéricas baseadas no método dos elementos finitos (MEF). De forma complementar, foi conduzida uma análise modal em função da máxima velocidade operacional de rotação da rosca. Foi utilizado o software comercial Ansys® 2023 R2, e foi aplicada a ferramenta GCI (Grid Convergence Index) para a avaliação da malha. As malhas apresentaram GCIs inferiores a 5,1%, provando serem escolhas adequadas para as estimativas numéricas de parâmetros estruturais e modais. A qualidade geométrica das malhas foi avaliada com métodos estatísticos. A medida obtida pela abordagem skewness resultou em valores inferiores a 0,3, indicando que os elementos finitos, especialmente em regiões críticas, possuem pouca distorção geométrica. Os resultados indicaram que a máxima tensão equivalente foi de 9 MPa e a máxima deformação foi de $1x10^{-4}$ m/m nos eixos das polias do sistema coreXY quando sujeita a condições de máximas velocidades de rotações dos motores de acionamento da movimentação. Dessa forma, os eixos das polias e as próprias polias do sistema de movimentação baseado no método coreXY foram considerados componentes críticos, com coeficientes de segurança superiores ao valor de 37. A mínima frequência natural da estrutura estimada foi de aproximadamente 34 Hz, superior à maior frequência de excitação da impressora, que ocorre devido à rotação da rosca a 80 rpm (1,33 Hz), acionada pelo motor de passo Nema 23 HT23-401 (Kalatec®, Brasil), equivalente a 400 rpm (6,67 Hz). Conclui-se que a solução técnica para o equipamento ou impressora 3D customizada possui elevada robustez estrutural, requisito técnico fundamental para compor atributos de reprodutibilidade de fabricação de geometrias especificas de peças, tanto para fins de pesquisa básica, quanto para geração efetiva de peças customizadas.

1. CONSIDERAÇÕES SOBRE FABRICO ADITIVO POR EXTRUSÃO BASEADO EM ROSCA

Material Extrusion Additive Manufacturing (MEX-AM) é uma tecnologia de fabrico aditivo em que ocorre a extrusão do material em estado fluído ou semissólido através de um bocal, em resposta à aplicação de pressão. Os mecanismos geradores de pressão mais comuns são a movimentação de um êmbolo, o deslocamento do próprio material filamentar ainda em estado sólido, e o arraste proporcionado pela rotação de uma ou mais roscas (GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2021; GUTIERREZ et al., 2018).

Cabeçotes de extrusão baseados em rosca têm sido aplicados para o fabrico aditivo de materiais com base polimérica nos últimos 20 anos (JUSTINO NETTO et al., 2021). Diferentes modelos de cabeçotes por extrusão têm sido desenvolvidos para integrar dispositivos de grande escala (REBAIOLI et al., 2019; TREJO et al., 2020; WANG et al., 2021b) ou de escala reduzida (SILVEIRA et al, 2014; JUSTINO NETTO et al., 2022; HUANG et al., 2020a; HUANG et al., 2020b; WANG et al., 2021a; VYAS et al., 2021)

com intuito de eliminar, minimizar, ou flexibilizar etapas precedentes inerentes à técnica Fused Filament Fabrication (FFF). Uma vez que os cabeçotes baseados em rosca são uma alternativa para a impressão direta a partir de matérias-primas em pó, grânulos ou pellets, estes podem ampliar a gama de materiais complexos disponíveis para investigação (GUTIERREZ et al., 2018; JUSTINO NETTO et al., 2022).

Silva et al. (2023) realizou uma revisão bibliográfica sistemática dos últimos cinco anos, em que foram analisados mais de setenta artigos sobre equipamentos com cabeçotes de extrusão por rosca a partir de materiais granulares de base polimérica. Os campos de aplicação mais relevantes foram o *Big Area Additive Manufacturing* (BAAM), a Engenharia de Tecidos e Medicina Regenerativa, a Reciclagem de Resíduos Poliméricos, e a Indústria de Fármacos.

Os estudos em BAAM abordaram o desenvolvimento de equipamentos de grande porte (MORENO NIETO et al., 2018); a modelação matemática ou numérica no processamento de materiais complexos (PRICCI et al., 2021; WANG et al., 2019); a avaliação da qualidade de impressão (KRCMA et al., 2022; TREJO et al., 2020; REBAIOLI et al., 2019; WANG et al., 2021b); a identificação dos principais desafios associadas a impressão em larga escala (ROSCHLI et al., 2019; WANG et al., 2020); o monitoramento em tempo real do perfil de pressão ao longo do cabeçote baseado em rosca (DVORAK et al., 2019); a comparação entre as técnicas FFF (Fused Filament Fabrication) e FGF (Fused Granular Fabrication) (OELSCH et al., 2021); o controle online dos parâmetros de impressão durante o processo (XIANG et al., 2021); e a caracterização mecânica (THAKUR et al., 2021; YEOLE et al., 2020), reológica (AJINJERU et al., 2021) e termomecânica dos materiais (BILLAH et al., 2020).

Os estudos no campo de Engenharia de Tecidos abordaram a conceção de equipamentos com cabeçotes de rosca simples (TSENG et al., 2018), com cabeçotes múltiplos (um baseado em rosca e dois baseados em êmbolos) para a fabricação de *scaffolds* com múltiplos materiais (LIU et al. 2018a; LIU et al., 2018b; LIU et al., 2018c), com cabeçotes com rosca associados à eletrofiação rotativa (HUANG et al., 2020a), e com cabeçotes de rosca simples associados à plataforma rotativa para o desenvolvimento de *stents* cardiovasculares com módulo de Poisson zero (WANG et al, 2021a). Além disso, VYAS et al. (2021) avaliaram as propriedades mecânicas dos scaffolds desenvolvidos, e HUANG et al. (2020b) efetuaram a validação funcional biológica para verificação da eficiência de alocação, crescimento e multiplicação celular nas estruturas.

O uso de cabeçote baseado em rosca para o processamento direto a partir de materiais granulados é especialmente vantajoso no campo da Reciclagem de Materiais. Os artigos publicados apresentam estudos com duas abordagens principais, a caracterização de propriedades térmicas e mecânicas dos materiais processados (DERTINGER et al., 2020; LITTLE et al., 2020; MANIDEEP et al., 2019) e a comparação da qualidade de impressão entre as técnicas FFF e FGF (ALEXANDRE et al., 2020; REICH et al., 2019; WOERN et al., 2018). As propriedades mecânicas das peças fabricadas de materiais reciclados do tipo PLA (Poliácido Láctico), PP (Polipropileno), PET (Politereftalato de Etileno), ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno) apresentaram limite de resistência à rotura menor do que os materiais virgens, e compatíveis com materiais reciclados comerciais (WOERN et al., 2018).

A aplicação de cabeçotes baseados em rosca para a indústria farmacêutica é promissora devido à possibilidade de produzir medicamentos personalizados, ou seja, corretamente formulados a partir das especificações do utilizador. Nesse contexto, dois trabalhos foram filtrados pelo método de busca de Silva et al (2023). Goyanes et al. (2019) destacam que comprimidos com itraconazol produzidos por impressão 3D apresentaram características físicas e mecânicas adequadas para a aplicação proposta, e não apresentaram nenhuma degradação do fármaco após o processamento. Samaro et al. (2021) compararam comprimidos impressos pela técnica FGF e FFF e afirmaram que nem todas as configurações de percentagem de drogas puderam ser impressas por meio da FFF, dado a necessidade de tornar as matérias-primas filamentosas. Eles concluíram que nesta área de estudo a técnica FGF é mais promissora pois permite uma maior possibilidade de personalização dos medicamentos.

Nos estudos realizados com cabeçotes baseado em rosca para fabrico aditivo, os equipamentos aplicados foram majoritariamente protótipos funcionais e não equipamentos comerciais. A sobreposição do uso de protótipos académicos funcionais está fortemente associada à capacidade de personalização da máquina de acordo com a características do material processado e do produto fabricado, dando maior flexibilidade aos estudos realizados. Por outro lado, é importante destacar que os equipamentos comerciais possuem a vantagem da praticidade de uso sem a necessidade de um projeto

preliminar (Silva et al. 2023; Justino Netto et al. 2021).

No projeto académico da impressora 3D avaliada neste estudo, o mini-cabeçote de extrusão por rosca é estático enquanto a plataforma de deposição realiza a movimentação cartesiana nos eixos X, Y e Z, baseado no equipamento desenvolvido por Sarout (2023). Esta foi uma solução construtiva aplicada para responder a diferentes requisitos de projeto, principalmente, no que diz respeito à massa elevada (3 kg) do cabeçote quando comparado com a massa de cabeçotes FFF (Fused Filament Fabrication); à instrumentação do cabeçote para monitoramento de temperatura ao longo das diferentes zonas de rosca; à instrumentação para o monitoramento de pressão na região do bocal de extrusão; e à alimentação por pó inerente ao processo.

Desta forma, uma etapa fundamental ao projeto de um dispositivo como uma impressora 3D são as análises estruturais e modais para identificar as regiões críticas, analisar os estados de tensão e deformação do equipamento, e estimar as frequências naturais de vibração da estrutura, evitando eventuais equívocos operacionais. Neste contexto, a avaliação estrutural e modal desta impressora 3D com mini-cabeçote vertical baseado em rosca simples foi conduzida para levantar as principais vantagens e os principais desafios desse novo conceito.

2. APRESENTAÇÃO DA SOLUÇÃO TÉCNICA DESENVOLVIDA PARA O EQUIPAMENTO CUSTOMIZADO COM CABEÇOTE MONOROSCA PARA FABRICO ADITIVO POR EXTRUSÃO DIRETA

O projeto customizado do equipamento de fabrico aditivo desktop com cabeçote de extrusão direta baseada em monorosca foi concebido de forma modularizada, dividido em cinco subsistemas principais: 1) subsistema de bombeamento e plastificação; 2) subsistema de acionamento; 3) subsistema de alimentação da matéria-prima em pó; 4) subsistema de movimentação nos eixos X, Y e Z; 5) subsistema de monitoramento de temperatura e pressão (que não será considerado nesta investigação estrutural e modal). A Figura 1 apresenta estes subsistemas.

O subsistema de bombeamento e plastificação do cabeçote proposto é composto, especialmente, pela rosca simples rotativa, pelo barril estacionário e pelo bocal de impressão 3D. O subsistema de acionamento, redução e

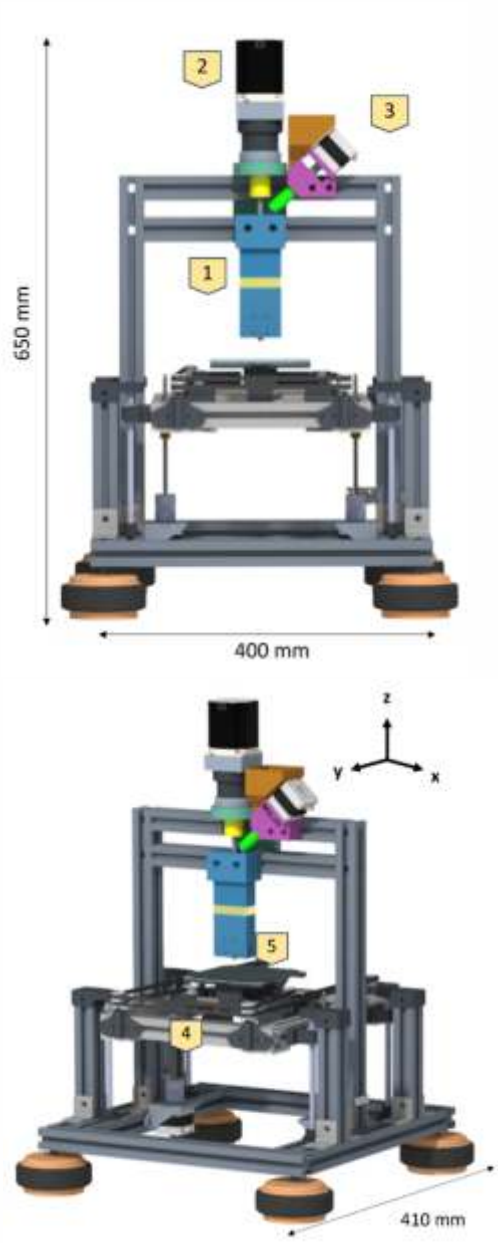


FIGURA 1
Modelação geométrica do equipamento para fabrico aditivo por extrusão monorosca.

transmissão é composto por um motor Nema 23 HT23-401 (Kalatec®, Brasil) acoplado a um redutor planetário PE II 050 de 5:1 (Apex Dynamics®, Japão). A conexão entre o eixo do redutor planetário com o eixo da rosca do sistema de bombeamento e plastificação é realizada por um acoplamento flexível customizado. O subsistema de alimentação por gravidade é formado por uma rampa de alimentação, enquanto o subsistema de alimentação por dosagem é composto por uma rosca transportadora, um barril estacionário, um funil de armazenamento, e um motor Nema 17 42HS48 (Kalatec®, Brasil), responsável pelo acionamento do subsistema. O subsistema de movimentação é composto por um coreXY responsável por realizar a movimentação nos eixos X e Y por meio de polias e correias, enquanto a movimen-

tação do eixo Z é realizada por meio de fusos e guias lineares. O sistema de movimentação é acionado por quatro motores de passo Nema 17 42HS48 (Kalatec®, Brasil) estrategicamente posicionados. A área de trabalho (build) máxima para o fabrico aditivo direto é de 100 x 80 x 80 mm³.

3. PROCEDIMENTO NUMÉRICO: GERAÇÃO DE MALHA, CONDIÇÕES DE CONTORNO, RESTRIÇÕES E PROPRIEDADES DOS MATERIAIS

Para avaliação numérica estrutural e modal da impressora 3D com mini-cabeçote de extrusão vertical baseado em rosca simples, aplicou-se o Método dos Elementos Finitos. O intuito da análise estrutural foi estimar o estado de tensão e deformação do equipamento, permitindo identificar os componentes críticos da impressora 3D e os coeficientes de segurança associados a cada um deles. Enquanto, o intuito da análise modal foi estimar as frequências naturais de vibração e os modos de vibrar. As principais etapas são: a) a determinação das condições de contorno e das simplificações geométricas; b) a determinação da malha e c) a atribuição dos materiais para os componentes simulados.

Foram adotadas simplificações nas análises do modelo geométrico da impressora 3D com o intuito de minimizar os esforços computacionais exigidos para as simulações numéricas, contudo mantendo os condições físicas de operação as mais próximas do real. As principais simplificações foram: a) a supressão de componentes eletrónicos sem funções estruturais (sensores de posição, temperatura e pressão); b) a substituição de elementos eletrónicos com função estrutural por força distribuídas (motor Nema 23 HT23-401, motor Nema Nema 17 42HS48 e redutor planetário 5:1 PE II 050); c) alterações geométricas da plataforma de deposição mantendo as propriedades físicas do componente; d) substituição de uniões parafusadas por contatos do tipo bonded; e) simplificação geométrica dos vibra stops e implementação de engastes nas extremidades inferiores. para as simulações estruturais; e f) substituição das correias por binários equivalentes nas polias. Para análise estrutural, foi feita a substituição do subsistema de bombeamento e plastificação por uma força adequadamente distribuída e a substituição das correias por binários máximos de 0,11Nm equivalentes nas polias. Para a análise modal, considerou-se o subsistema de bombeamento e deposição, dado o impacto da sua geometria no momento de inércia avaliado, além disso, a plataforma de deposição foi deslocada para extremidade do eixo Y de forma

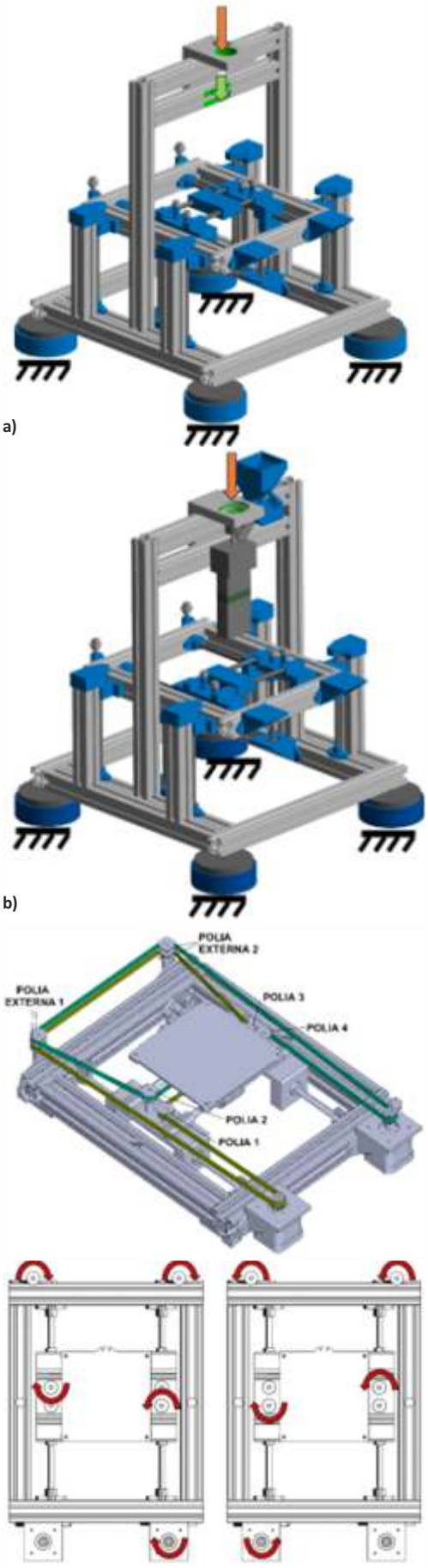


FIGURA 2
Modelos geométricos simplificados. a) para análise estrutural, b) para análise modal, c) binários atribuídos às polias pelas correias do sistema core XY.

a amplificar as consequências de estados menos estáveis da impressora 3D. Em ambos tipos de análise, a plataforma de deposição foi posicionada no seu curso máximo do eixo Z com o intuito de potencializar instabilidades no sistema mecânico. Os modelos geométricos simplificados, as principais condições de contorno e os binários atribuídos às polias podem ser observados nas imagens da Figura 2.

A avaliação da qualidade de malha foi efetuada pelo método GCI (Grid Convergence Index) (Roache, 1998), baseado na Extrapolação de Richardson (1991), capaz de utilizar os resultados provenientes de três tamanhos de malha distintos para estimar a solução assintótica e prever as margens de erro desta aproximação. Os critérios adotados no método são que cada malha utilizada deve possuir pelo menos 220% mais elementos do que a malha anterior, visando tamanhos de malha mais abrangentes conforme Celik et al. (2020). Para a determinação do GCI deste estudo, foram investigadas três malhas: A (a malha mais refinada); B (a malha intermediária); C (a malha menos refinada). O GCI deve ser inferior a 5% para que seja considerada que a malha mais refinada seja adequada para a realização das simulações dos parâmetros avaliados, conforme proposto por Celik et al. (2020). Neste estudo, os parâmetros avaliados pelo método GCI foram a tensão e o deslocamento do centro da plataforma de deposição para análise estrutural e frequência de vibração para análise modal.

Para avaliar a qualidade geométrica da malha foram considerados dois fatores: skewness e aspect ratio. O skewness refere-se a uma medida da distorção angular de um elemento de malha em relação ao ângulo ideal equivalente ao ângulo de polígonos perfeitos. Valores de skewness próximos de zero indicam que o elemento está próximo da forma ideal, enquanto valores mais altos indicam uma maior distorção. Skewness entre 0,25 e 0,50 são considerados bons (Ansys, 2010). Aspect ratio é a razão entre o comprimento da maior aresta de um elemento de malha e o comprimento da menor aresta. Esta métrica ajuda a identificar elementos alongados que podem afetar a precisão dos resultados da simulação. Um aspeto ideal é próximo de um, indicando que todas as arestas têm comprimentos semelhantes (Ansys, 2010). Para alcançar valores óptimos de skewness e aspect ratio, empregou-se o método de varrimento, ou sweep method, que proporciona uma malha de qualidade com um número reduzido de nós, diminuindo assim o custo computacional.

Os materiais atribuídos para os componentes da impressora 3D com mini-cabeçote vertical baseado em rosca podem ser vistos na Figura 3.

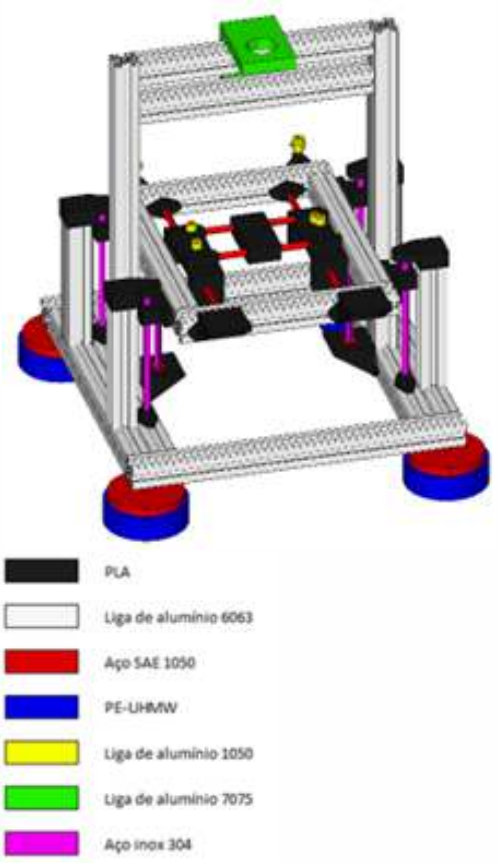


FIGURA 3
Principais materiais atribuídos à estrutura da impressora 3D: PLA - Poliácido láctico; Liga de alumínio 6063; Aço SAE 1050; PE UHMW - Polietileno de ultra alto peso molecular; Liga de alumínio 1050; Liga de alumínio 7075; Aço inox 304.

Os resultados das malhas, das análises estruturais e modais são apresentados no próximo tópico.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DA MALHA

Foram utilizadas três tipos de malhas em cada análise para a determinação do GCI. Todas as malhas foram geradas maioritariamente com elementos tetraédricos e hexagonais com aresta máxima de 6 mm. A malha $A_{estrutural}$ é composta por 3580775 elementos finitos, a malha $B_{estrutural}$ por 1595255 elementos finitos, e a malha $C_{estrutural}$ por 614383 elementos finitos. A malha A_{modal} é composta por 2883996 elementos finitos, a malha B_{modal} por 957964 elementos finitos, e a malha C_{modal} por 43512 elementos finitos. Os GCIs determinados para os dois conjuntos de malhas podem ser vistos na Tabela 1 e Tabela 2, respetivamente.

Observando a Tabela 1 e a Tabela 2, pode-senotar que os GCIs ficaram maioritariamente

TABELA 1
GCIs, tensão e deslocamento nas malhas avaliadas para análise estrutural.

	A	B	C	GCI (%)
Tensão (Pa)	6876,3	6875,9	6874,4	0,004
Deslocamento (m)	1,982E-05	1,980E-05	1,961E-05	0,029

TABELA 2
GCIs e frequência natural de vibração dos cinco primeiros modos nas malhas avaliadas para análise estrutural.

Frequência	A	B	C	GCI (%)	Modo
Natural (Hz)	34,165	34,264	34,734	-0,04	1
	38,983	39,584	40,732	-0,86	2
	105,950	108,560	109,640	-5,05	3
	106,810	108,960	109,780	-3,46	4
	124,800	126,900	129,690	-1,95	5

abaixo de 5% para o conjunto de malhas analisadas, dessa forma a malha mais refinada ($A_{estrutural}$ e A_{modal}) possuem qualidade adequada para serem utilizadas nas simulações numéricas conduzidas neste estudo. Além disso, é possível notar na Tabela 2, GCIs com valores negativos, indicando que os resultados obtidos para a frequência natural decrescem assintotica-mente conforme a malha é refinada. Com base nos resultados obtidos de GCI, pode-se afirmar que a interpretação dos parâmetros de análise é apropriada. As malhas utilizadas para as simulações estrutural e modal podem ser observadas na Figura 4a e Figura 4b.

TABELA 3
Fatores geométricos das malhas A.

	Fatores	$A_{estrutural}$	A_{modal}
Skewness	Valor médio	0,28	0,27
	Desvio padrão	±0,17	±0,17
Aspect ratio	Valor médio	2,49	1,75
	Desvio padrão	±1,98	±2,41

A Figura 4c apresenta em detalhe a composição da malha, em que se pode notar a presença de diferentes geometrias de elementos finitos. Predominantemente, elementos hexagonais (face quadrangular) e tetraédricos (face triangular), conforme visto na Figura 5. Além disso, observando a Tabela 2, percebe-se que os valores médios de skewness e aspect ratio estão próximos de 0,25 e não muito maior do que 2, indicando que a malha possui boa qualidade geométrica.

4.2 ANÁLISE ESTRUTURAL, ESTIMATIVA DA RIGIDEZ

Os resultados de tensões, deformações e deslocamentos podem ser verificados na Figura 6.

Verificando a Figura 6, pode-se notar que as tensões tendem a se concentrar nas regiões do

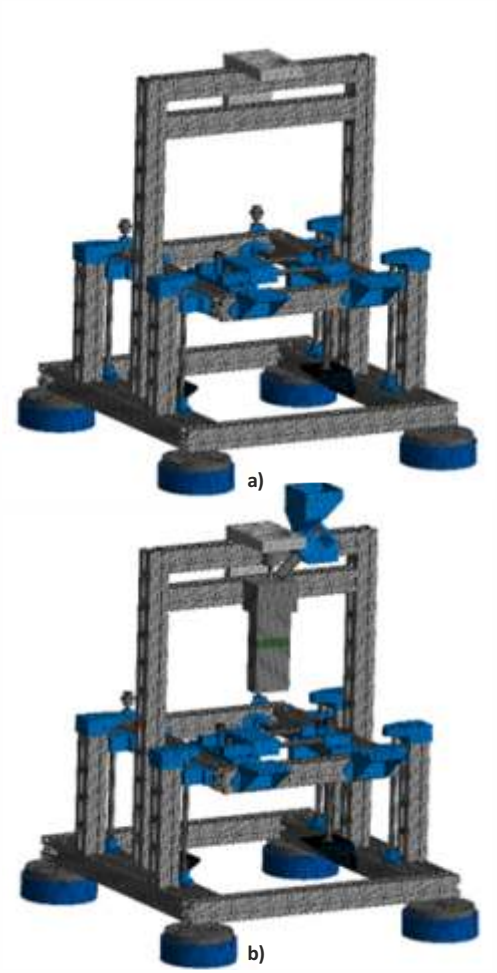


FIGURA 4
Malhas A. a) estrutural. b) modal. c) detalhe da malha estrutural.

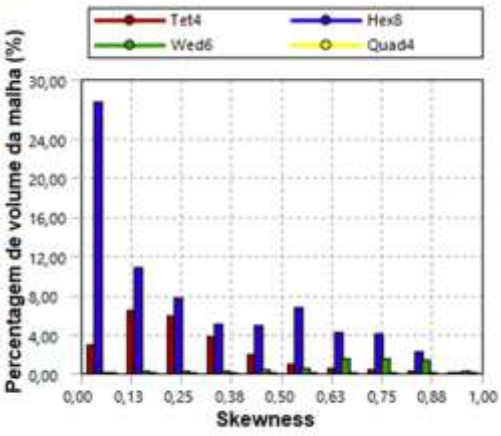


FIGURA 5
Percentagem dos tipos de elementos da malha de acordo com o skewness.

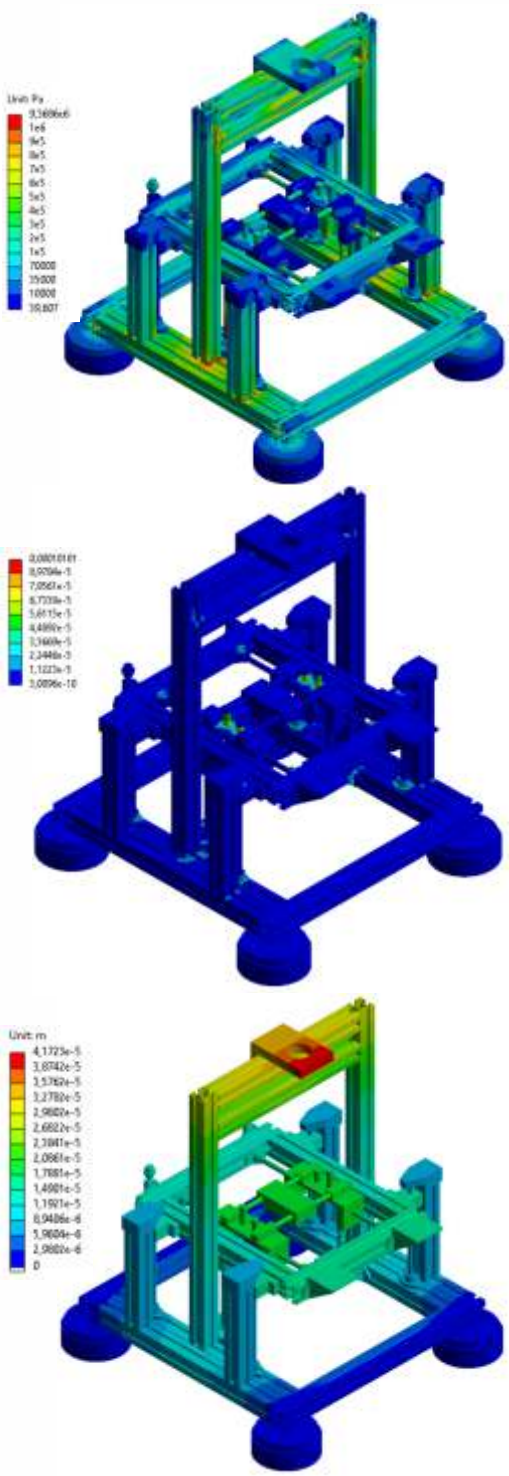


FIGURA 6
Distribuição de: a) tensões, b) deformação, c) deslocamento da impressora 3D.

chassis da estrutura de perfis de liga de alumínio 6063 e nas regiões de menor secção transversal, como as guias lineares e os eixos das polias de movimentação. Além disso, é nas regiões das polias que se verificam as maiores deformações, sendo estas regiões críticas do sistema mecânico avaliado. Os máximos deslocamentos acontecem devido à massa robusta do suporte do subsistema de acionamento, redução e transmissão, conforme verificado na Figura 6c.

TABELA 4
Coeficiente de segurança das regiões críticas.

Componente	Material	Deslocamento (m)	Tensão (MPa)	Tensão de cedência (MPa)	Coeficiente de segurança
Eixo polia 1	Aço SAE 1050	1,90E-05	8,17	365	45
Eixo polia 2	Aço SAE 1050	1,92E-05	8,48	365	43
Eixo polia 3	Aço SAE 1050	1,91E-05	8,19	365	45
Eixo polia 4	Aço SAE 1050	1,91E-05	8,50	365	43
Polia 1	Alumínio 1050	1,92E-05	2,62	103	39
Polia 2	Alumínio 1050	1,95E-05	2,71	103	38
Polia 3	Alumínio 1050	1,93E-05	2,80	103	37
Polia 4	Alumínio 1050	1,94E-05	2,70	103	38

Nota-se a partir da Tabela 4, que o menor valor de coeficiente de segurança foi de 37, considerando os componentes críticos. Esses valores conferem robustez à estrutura, e não é um fator que contribui para aumentar significativamente o custo do protótipo funcional do equipamento. O cabeçote de extrusão exigirá condições operacionais que permitam acessos constante em função de limpeza do par rosca/barril, da instrumentação para inserção de transdutores miniaturizados de temperatura e pressão, além do sistema de arrefecimento/aquecimento. Todos estes aspectos conduzem à escolha de um cabeçote robusto, com maior rigidez.

4.3 ANÁLISE MODAL

Por meio da simulação modal, determinou-se os primeiros cinco modos de vibração da estrutura. Os resultados de frequência natural podem ser observados na Tabela 5 para a malha Amodal e os modos foram ilustrados na Figura 7.

TABELA 5
Frequências natural dos cinco primeiros modos de vibrar.

Modo	Frequência(Hz)
1	34,15
2	38,71
3	101,67
4	103,85
5	122,86

A maior frequência de excitação da impressora dá-se devido à rotação da rosca acionada pelo motor de passo Nema 23 HT23-401 (Kalatec®, Brasil) com um binário máximo equivalente a 400 rpm (6,67 Hz) antes do redutor planetário PE II 050 de 5:1 (Apex Dynamics®, Japão), conforme pode ser visto na Figura 1. Nesse contexto, a análise da Tabela 5 revela que a frequência máxima que pode ser induzida na impressora durante o seu uso devido à rotação do motor de passo e redução encarregados da rotação da rosca do extrusor é inferior a todos os modos de vibração estimados, minimizando o risco de que os motores da máquina atinjam as frequências de ressonância da estrutura.

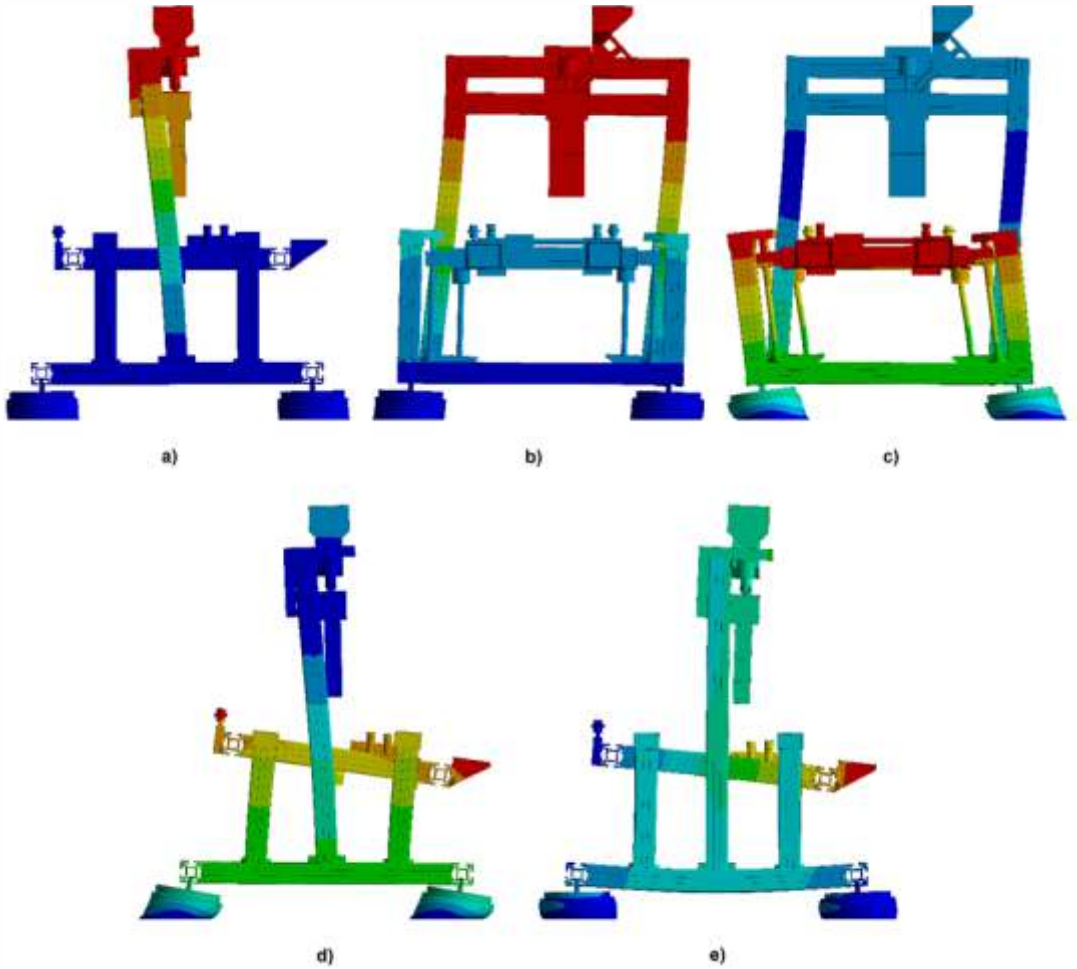


FIGURA 7
Representação dos modos de vibração; (a) modo 1, (b) modo 2, © modo 3, (d) modo 4, e (e) modo 5.

5. CONCLUSÕES PRELIMINARES

Apresentar uma abordagem sistemática na estimativa de rigidez do equipamento de impressão 3D é uma prerrogativa fundamental em projeto de sistemas mecânicos. Neste contexto, baseado nos resultados apresentados, podem ser estabelecidas as seguintes conclusões:

- A solução desenvolvida de projeto modular para o equipamento da impressora 3D customizada desktop para fabrico aditivo direto por extrusão, utilizando matéria-prima em estado de pó, apresenta rigidez suficiente (CS = 37) e modos de vibração muito inferiores às velocidades operacionais de rotação mínima e máxima da rosca;
- O equipamento ou impressora 3D customizada possui elevada robustez estrutural, requisito técnico fundamental para os atributos finais de reprodutibilidade de fabricação de geometrias específicas de peças, tanto para fins de investigação básica, quanto para geração efetiva de peças customizadas;
- A configuração modular proposta possui uma abordagem bastante distinta das soluções comerciais de impressoras 3D desktop sendo um projeto inovador de equipamento para fabrico aditivo.

6. TRABALHOS FUTUROS

Os próximos passos deste projeto consistem na implementação do hardware dos elementos eletrónicos e na indexação do movimento da estrutura; na fabricação das features para montagem dos transdutores de temperatura e de pressão; e no procedimento de calibração do sistema de instrumentação na região do cabeçote de extrusão monorosca, permitindo a realização dos primeiros testes de deposição aditiva direta.

AGRADECIMENTOS

Ao programa de pós-graduação de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo; ao CNPq 302131/2023-0; à CAPES 88887.817119/2023-00; e CAPES-Print 88887.916574/2023-00.

REFERÊNCIAS

A. Alexandre et al. Mechanical Properties of Direct Waste Printing of Polylactic Acid with Universal Pellets Extruder: Comparison to Fused Filament Fabrication on Open-Source Desktop Three-Dimensional Printers. 3D Printing and Additive Manufacturing, 7(5), 237-247. 2020. https://doi.org/10.1089/3dp.2019.0195

A. Pricci, et al. Analytical and numerical models of thermoplastics: A review aimed to pellet extrusion-based additive manufacturing. Polymers, 2021.13(18). http://dx.doi.org/10.3390/polym13183160

A. Roschli et al. Designing for Big Area Additive Manufacturing. Additive Manufacturing, 25(September 2018), 275-285, 2019. https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.11.006

A. Samaro et al. Can filaments, pellets and powder be used as feedstock to produce highly drug-loaded ethylene-vinyl acetate 3D printed tablets using extrusion-based additive manufacturing? International Journal of Pharmaceutics, 607, 120922, 2021. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2021.120922

A. Thakur et al. Large-scale additive manufacturing of high strength fiber-reinforced polymer composites. International SAMPE Technical Conference, 2021-June, 1312-1322.

A.L. Woern et al. Fused particle fabrication 3-D printing: Recycled materials' optimization and mechanical properties. Materials, 11(8). https://doi.org/10.3390/ma11081413

ANSYS. (2010). ANSYS 13.0 Software Help Files.

B.Huang et al. Aligned multi-walled carbon nanotubes with nanohydroxyapatite in a 3D printed polycaprolactone scaffold stimulates osteogenic differentiation. Materials Science and Engineering C, 108, 2020. http://dx.doi.org/10.1016/j.msec.2019.110374

B.Huang et al. Engineered dual-scale poly (-caprolactone) scaffolds using 3D printing and rotational electrospinning for bone tissue regeneration. Additive Manufacturing, 36, 2020. http://dx.doi.org/10.1016/j.addma.2020.101452

C.Ajinjeru et a. Rheological survey of carbon fiber-reinforced high-temperature thermoplastics for big area additive manufacturing tooling applications. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 34(11), 1443-1461, 2021. https://doi.org/10.1177/089270571987394

C.Vyas et al. 3D printing of silk microparticle reinforced polycaprolactone scaffolds for tissue engineering applications. Materials Science and Engineering C, 118, 2021. http://dx.doi.org/10.1016/j.msec.2020.111433

Celik, I.B., Ghia, U., Roache, P.J., & Freitas, C.J. (2007). "Procedure for Estimation and Reporting of Uncertainty Due to Discretization in CFD Applications".

D. Moreno Nieto et al. Large-format polymeric pellet-based additive manufacturing for the naval industry. Additive Manufacturing, 23(July), 2018. 79-85. https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.07.012

D. Silva et al. (2022). Revisão Bibliográfica Sistemática sobre processos aditivos por extrusão utilizando cabeçotes com rosca. XV Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica.En: Universidad Politécnica de Madrid. (2022-11-22). https://doi.org/10.26678/abcm.cobem2021.cob2021-1416

E. Meraz Trejo et al. Compressive deformation analysis of large area pellet-fed material extrusion 3D printed parts in relation to in situ thermal imaging. Additive Manufacturing, 33(May 2019), 101099, 2020. https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101099

E. Meraz Trejo et al. Compressive deformation analysis of large area pellet-fed material extrusion 3D printed parts in relation to in situ thermal imaging. Additive Manufacturing, 33(May 2019), 101099, 2020. https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101099

E. Oelsch et al. Comparative investigation on the mechanical behavior of injection molded and 3D-printed thermoplastic polyurethane. Journal Of Rubber Research, 24(2, SI), 249-256, 2021. https://doi.org/10.1007/s42464-021-00092-w

F Liu et al. A plasma-assisted bioextrusion system for tissue engineering. CIRP Annals, 67(1), 229-232, 2018. https://doi.org/10.1016/j.cirp.2018.04.077

F Liu et al.. User interface tool for a novel plasma-assisted bio-additive extrusion system. Rapid Prototyping Journal, 24(2), 368-378, 2018. http://dx.doi.org/10.1108/RPJ-07-2016-0115

Gibson, I.; Rosen, D.; Stucker, B. Additive Manufacturing Technologies,3ed., Springer Nature: Switzerland, 2021.

Goyanes, A. et al. Direct powder extrusion 3D printing: Fabrication of drug products using a novel single-step process. International Journal of Pharmaceutics, v. 567, n. May, 2019

H. A. Little et al. Towards distributed recycling with additive manufacturing of PET flake feedstocks. Materials, 13(19), 2020. http://dx.doi.org/10.3390/MA13194273

J. Dvorak et al. Measurement and analysis of pressure profile within big area additive manufacturing single screw extruder. Solid Freeform Fabrication 2019: Proceedings of the 30th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium - An Additive Manufacturing Conference, SFF 2019, 1242-1250

J. G. Gutierrez, et al. Additive manufacturing of metallic and ceramic components by the material extrusion of highly-filled polymers: a review and future perspectives. Materials 11(5):840, 2018. https://doi.org/10.3390/ma11050840

J. G. Gutierrez, et al. Additive manufacturing of metallic and ceramic components by the material extrusion of highly-filled polymers: a review and future perspectives. Materials 11(5):840, 2018. https://doi.org/10.3390/ma11050840

J. W. Tseng et al. Screw extrusion-based additive manufacturing of PEEK. Materials & Design, 140, 209-221, 2018. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.11.032

J.M. Justino Netto et al. Screw-assisted 3D printing with granulated materials: a systematic review. "Int J Adv Manuf Technol" 115, 2711-2727, 2021. https://doi.org/10.1007/s00170-021-07365-z

JM Justino Netto et al. Design and validation of an innovative 3D printer containing a co-rotating twin screw extrusion unit. Additive Manufacturing, v. 59, n.October, 2022.

K. M. M, Billah et al. Thermomechanical characterization of short carbon fiber and short glass fiber-reinforced ABS used in large format additive manufacturing. Additive Manufacturing, 35(April), 2021, 101299. https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101299

L. Rebaioli et al. Process parameters tuning and online re-slicing for robotized additive manufacturing of big plastic objects. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 55, 55-64, 2019. http://dx.doi.org/10.1016/j.rcim.2018.07.012

L. Rebaioli et al.. Process parameters tuning and online re-slicing for robotized additive manufacturing of big plastic objects. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 55, 55-64, 2019. http://dx.doi.org/10.1016/j.rcim.2018.07.012

M. Krcma et al. Comparison of the effects of multiaxis printing strategies on large-scale 3D printed surface quality, accuracy, and strength. International Journal Of Advanced Manufacturing Technology, 119(11-12), 7109-7120 2021. https://doi.org/10.1007/s00170-022-08685-4

M.J. Reich et al.Mechanical properties and applications of recycled polycarbonate particle material extrusion-based additive manufacturing. Materials, 12(10), 2019. https://doi.org/10.3390/ma12101642

P. Manideep et al.Design and development of pallet extruder. In V. T. V. K. S. S. B. B. S. K. K. (Ed.), AIP Conference Proceedings (Vol. 2200). American Institute of Physics Inc, 2019. https://doi.org/10.1063/1.5141260

Richardson, L.F. (1911). "The approximate arithmetical solution by finite differences of physical problems including differential equations, with an application to the stresses in a masonry dam". Philosophical Transactions of the Royal Society of London A, 210(459-470), 307-357.

Roache, P.J. (1998). "Verification and validation in computational science and engineering". Computing in Science & Engineering, 1, 8-9.

S. Dertinger. Technical pathways for distributed recycling of polymer composites for distributed manufacturing: Windshield wiper blades. Resources, Conservation and Recycling, 157(March), 104810, 2020. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104810

Y Xiang et al. Trajectory Control and Simulation of 6-DOF Robotic System Based on Screw Theory. IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference), 2021-Octob. https://doi.org/10.1109/IECON48115.2021.9589141

Z. Wang, A statistical homogenization approach for incorporating fiber aspect ratio distribution in large area polymer composite deposition additive manufacturing property predictions. Additive Manufacturing, 43, 2021. http://dx.doi.org/10.1016/j.addma.2021.102006

Z. Wang, A statistical homogenization approach for incorporating fiber aspect ratio distribution in large area polymer composite deposition additive manufacturing property predictions. Additive Manufacturing, 43, 2021. http://dx.doi.org/10.1016/j.addma.2021.102006

Z. Wang, Z.& D. E. Smith, (2019). Numerical analysis of screw swirling effects on fiber orientation in large area additive manufacturing polymer composite deposition. Composites Part B: Engineering, 177, 2019.

Z.C. Silveira et al. Design development and functional validation of an interchangeable head based on mini screw extrusion applied in an experimental desktop 3-D printer, "Int. J. Rapid Manufacturing", v. 4, n. 1, pp. 49-65, 2014. DOI:10.1504/IJRAPIDM.2014.062037



INOVAÇÃO EM FABRICO ADITIVO

Paulo J. Morais[1], Philip Carvalho[1], Lara Serra[1], Ricardo Faustino[1], Jorge Ferreira [2]
1 ISQ - Instituto de Soldadura e Qualidade, *Av. Prof. Doutor Cavaco Silva, 33 – Taguspark, 2740-120 Porto Salvo*
2 INTERMOLDE - Moldes Vidreiros Internacionais, Lda., *Rua de Espanha, lote 21, 2430-028 Marinha Grande*

1. AGENDA INOV.AM

A agenda INOV.AM (Inovação em Fabricação Aditiva) é um programa mobilizador de Inovação em Fabrico Aditivo liderado pela empresa Erofio-Engenharia e Fabricação de Moldes, S.A. e coordenada cientificamente pela Universidade do Minho. A agenda é composta por empresas de diversos setores de atividade e um conjunto de entidades do sistema científico nacional, com o intuito de promover o desenvolvimento em várias áreas de intervenção, tais como: novos materiais, processos avançados de fabrico aditivo, processos avançados de pós-produção, automação avançada e software de controlo, novos produtos, formação e capacitação de recursos humanos. Com o objetivo de capacitar os recursos humanos das empresas em questões essenciais do fabrico aditivo, este programa também visa o desenvolvimento de um plano de formação/certificação avançado, que será implementado de forma abrangente em todas as áreas de aplicação abordadas por este programa.

A agenda INOV.AM tem como meta promover a adoção e implementação do fabrico aditivo em diversos setores da indústria portuguesa, visando impulsionar a inovação e a competitividade do país no mercado global. O fabrico aditivo, também vulgarmente conhecida como impressão 3D, apresenta vantagens significativas, como a capacidade de produzir peças personalizadas e de alto valor agregado de maneira mais eficiente e sustentável do que os métodos tradicionais de fabrico. Através da agenda INOV.AM pretende-se estimular a colaboração entre empresas, centros de investigação e instituições de ensino para desenvolver e implementar soluções inovadoras baseadas na fabrico aditivo. Além disso, a agenda visa promover a formação e capacitação de profissionais qualificados para atuar nesse campo, assegurando que Portugal esteja preparado para competir e liderar no mercado internacional. Ao promover a inovação e a adoção do fabrico aditivo, a agenda INOV.AM tem como objetivo final impulsionar a economia portuguesa, criar empregos qualificados e promover o desenvolvimento nacional. Destacando o potencial do fabrico aditivo, Portugal pode posicionar-se como um líder na indústria global, oferecendo produtos inovadores de alta qualidade e contribuindo para a competitividade e o crescimento do país.

A Figura 1 apresenta esquematicamente os indicadores de desempenho a alcançar até ao fim do período de execução da agenda INOV.AM.

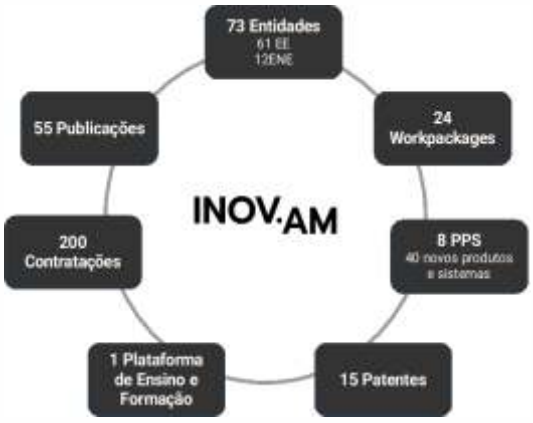


FIGURA 1
Indicadores de desempenho da agenda INOV.AM

A agenda é constituída por 73 entidades (Figura 2), entre empresas de vários sectores de atividade e entidades do sistema científico nacional, ascendendo o investimento da agenda a cerca de 77 milhões €.



FIGURA 2
Entidades participantes na agenda INOV.AM

2. O ISQ NA AGENDA INOV.AM

A participação do ISQ na agenda INOV.AM passa por dois tipos distintos de atividades:

a. Contribuir no desenvolvimento e implementação de uma Academia que abranja o território nacional e permita a rápida capacitação de recursos humanos na área do fabrico aditivo;

b. Contribuir no desenvolvimento e aplicação em ambiente laboratorial e operacionalização em ambiente fabril a utilização de processos de fabrico aditivo na otimização de moldes especializados para várias indústrias.

2.1 ACADEMIA DE FABRICO ADITIVO INOV.AM

De entre as várias atividades em curso na Agenda, o ISQ, através de elementos da sua própria Academia (ISQ Academy), contribui para o desenvolvimento de uma Academia de Fabrico Aditivo, juntamente com outras entidades, como a Universidade do Minho, Universidade de Coimbra, Instituto Politécnico de Leiria, TecMinho, Norcam, Codi e StartUp Leiria. A Academia INOV.AM será no futuro constituída por 5 polos pedagógicos (Guimarães, Coimbra, Leiria, Marinha Grande e Lisboa), que funcionarão como plataforma de conhecimento e cooperação entre entidades, destinada à qualificação de recursos humanos em Fabrico Aditivo, abrangendo desde operacionais, gestores, engenheiros de desenvolvimento de produto a outros recursos humanos relevantes na cadeia de valor.

Pretende-se com esta Academia INOV.AM, capacitar profissionais com competências holísticas e especializados em Fabrico Aditivo, que permitam acompanhar o rápido desenvolvimento desta tecnologia e avançar para uma implementação efetiva da mesma. Nesse sentido, prevê-se uma oferta formativa modular, de curta e média duração, assente em metodologias práticas apoiadas pelos laboratórios de cada um dos pólos pedagógicos e que funcionará em regime presencial e/ou em *b-learning*. Orientada para uma formação progressiva, através de vários níveis de complexidade e desempenho, a oferta formativa da Academia permitirá conhecer de forma aprofundada os princípios operacionais e os processos tecnológicos da fabrico aditivo, limitações e vantagens, aplicações, materiais, passando ainda pelo design (DfAM), controlo da qualidade das peças produzidas ou até pela gestão e análise de custos de produção.

O ISQ Academy tem colaborado e contribuído de forma ativa para atividades de cocriação no campo do fabrico aditivo, que permitem a materialização desta academia INOV.AM, além da oferta que já tem no seu próprio catálogo formativo. Desta forma, tem contribuído de forma especializada em tarefas como:

- Diagnósticos de necessidades prospetivas de competências nacionais em fabrico aditivo (nos diversos materiais, tecnologias e processos), em colaboração com o consórcio;
- Design de modelos de percursos de formação em fabrico aditivo que sejam modulares, flexíveis e capitalizáveis, que permitam a capacitação, *upskilling* (e *reskilling* em alguns casos) e certificação ou reconhecimento de competências;
- Design e execução de unidades/percursos modulares de curta-média duração, com metodologias práticas - *hands on* e casos de estudo, apoiados em equipamentos existentes nos pólos de formação, permitindo uma capacitação gradual e progressiva, passando por diversos níveis de complexidade e de desempenho;
- Design de cursos de formação, avaliação e reengenharia para transferência, direcionado quer para competências gerais e de sensibilização para decisores, quer para competências mais especificas de técnicos especialistas, operadores e supervisores.

2.2 FABRICO ADITIVO EM MOLDES PARA A INDÚSTRIA VIDREIRA

No âmbito da agenda INOV.AM, o ISQ, em conjunto com as empresas INTERMOLDE e VIDRIMOLDE, estão a desenvolver uma aplicação de deposição para otimização de moldes para a indústria vidreira, tendo por base o processo de fabrico aditivo de Deposição com Energia Direcionada (DED, do inglês Directed Energy Deposition).

O processo de fabrico de garrafas e embalagens de vidro utiliza sempre um conjunto de molde e contramolde. Os moldes também podem ser chamados de moldes finais ou moldes de acabar enquanto os contramoldes servem para dar uma pré-forma à gota de vidro e dessa forma facilitar a moldagem da forma final da garrafa ou frasco (também chamados de moldes de principiar). Os contramoldes são maioritariamente fabricados em ferro fundido enquanto os moldes de acabar podem ser fabricados no mesmo ferro fundido que os contramoldes ou também em bronze. A diferença entre os dois tipos de moldes está na capacidade de transferência de calor, que é muito superior nos moldes de bronze, o que faz com que a cadência de produção seja maior, gerando maior produtividade que os moldes de ferro fundido. A razão pela não utilização apenas de moldes de bronze, com melhor desempenho, é sobretudo o preço, 2 a 3 vezes o preço do mesmo molde

em ferro fundido, e a falta de capacidade dos fornos em produzir vidro de forma a alimentar a alta cadência exigida pelos moldes de bronze.

Tanto os moldes de principiar como os moldes de acabar têm normalmente as arestas das zonas moldantes revestidas a uma liga de níquel com diferentes durezas consoante a especificação apresentada pelos clientes. O revestimento das arestas tem a finalidade de conferir melhores propriedades mecânicas a uma zona de fortes impactos, dadas as cadências e as condições adversas no fabrico de embalagens de vidro. Outra das razões é permitir corrigir o desgaste das arestas através de processos manuais de revestimento com maçarico oxiacetilénico e com projeção de pó de níquel (Plasma com Arco Transferido), sendo estes os processos convencionais de deposição em ambiente fabril. No entanto, os processos acima descritos para aplicação de arestas funcionais apresentam problemas de produtividade (por exemplo, necessidade de pré-aquecimento dos moldes), gasto excessivo de consumíveis e tempo de vida útil relativamente reduzido dos moldes.

O processo de fabrico aditivo de DED, em especial na sua variante que recorre à utilização de tecnologia LASER (DED-LB), apresenta-se como um excelente candidato para conseguir aumentar a eficiência nos moldes de ferro fundido produzidos pelo parceiro VIDRIMOLDE, sendo uma solução de deposição mais rápida de revestimentos de níquel nas arestas, sem necessidade de pré-aquecimento dos moldes e com menor desperdício de pó possibilitando uma produção mais sustentável. Para os moldes de bronze produzidos pela INTERMOLDE, pretende-se igualmente encontrar uma solução de deposição mais rápida de arestas, mas também mais eficaz, capaz de aumentar a longevidade dos moldes uma vez que estes têm, atualmente, um tempo de vida relativamente reduzido. Também aqui a tecnologia DED permite a deposição eficaz de ligas de níquel nas arestas dos moldes, com vantagens evidentes. O recurso a tecnologias de fabrico aditivo, como o DED, visa proporcionar, pelas razões apresentadas, uma alternativa que não só melhore a cadência de produção dos moldes como também o aumento da longevidade dos mesmos.

2.2.1 O processo de DED

O processo de DED é uma das mais recentes adições à família de processos conhecidos como fabrico aditivo. Depois da estereolitografia (SLA), da extrusão de material (MEX) e da fusão em cama de pó (PBF) terem sido desenvolvidos nos finais dos anos 80 [1], veio a criação da deposição com energia direcionada. Em 1995, a primeira versão de DED foi desenvolvida por Sandia National Laboratories e, posteriormente, comercializada pela Optomec com o nome de LENS (*Laser Engineered Net Shaping*) [2]. Devido à proteção limitada da patente, outras empresas começaram a desenvolver os seus próprios sistemas de DED cada uma dando a sua própria designação. Outros nomes pelo qual o processo DED pode ser conhecido, dependendo do tipo de fonte térmica que utiliza, são LMD (*Laser Metal Deposition*), DMD (*Direct Metal Deposition*), WAAM (*Wire and Arc Additive Manufacturing*), EBM (*Electro Beam Freeform Fabrication*), entre outros [3].

De acordo com a norma ISO ASTM 52900, o processo DED é classificado como um processo de fabrico aditivo no qual um foco de energia térmica é usado para fundir materiais enquanto estes são depositados [4]. O material, habitualmente metálico, pode tomar duas configurações: pó ou fio. No caso do pó metálico, este é transportado para a zona de trabalho através de um fluxo de gás inerte (habitualmente árgon ou hélio) que ao passar através de um bocal, direciona o jato de pó. No caso do fio metálico, o sistema de alimentação é semelhante ao que é utilizado em processos de soldadura tradicional, onde o bocal se traduz numa tocha de soldadura. Relativamente à fonte de calor, existem 3 principais tipos: feixe de laser (DED-LB), feixe de eletrões (DED-EB) e arco elétrico (DED-Arc). Nos sistemas que utilizam feixe de laser, o laser é transportado para a cabeça de trabalho através de uma fibra ótica. Esta cabeça de trabalho possui um sistema de focagem que permite regular o tamanho do foco e à sua saída existe um bocal por onde o laser passa axialmente e por onde o pó é também ejetado, dividido em vários feixes separados (entre 3 e 6). Outras configurações podem incluir um jato de pó alimentado lateralmente, ou até ter as posições invertidas, ou seja, o pó ser alimentado axialmente e o feixe laser ser emitido lateralmente (menos comum). Por vezes, quando se utilizam materiais mais reativos com a atmosfera, são utilizados sistemas locais de proteção para aumentar a concentração do gás inerte na zona de trabalho, o que ajuda a arrefecer a poça de fusão e a evitar a oxidação. O DED EB funciona de forma semelhante ao DED-LB onde um feixe de eletrões passa axialmente pela cabeça de trabalho e é alimentado com fio (lateralmente) ou pó (axialmente ou lateralmente). Por último, DED-Arc, na sua forma mais simples, assemelha-se em todos os aspetos à soldadura robotizada, no qual um fio é transportado até a uma tocha de soldadura. Usualmente

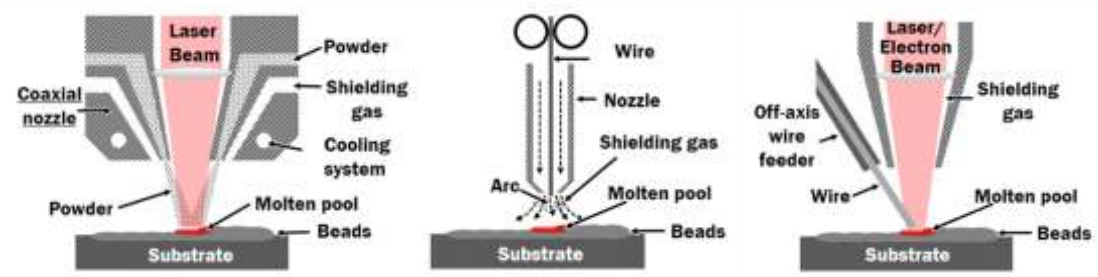


FIGURA 3
Esquemas representativos dos processos de DED-LB, DED-Arc e DED-EB (da esquerda para a direita, respetivamente) [3].

são sistemas baseados em processos de soldadura MIG/MAG, TIG ou plasma. Na Figura 3, estão representados esquemas que demonstram o funcionamento dos diferentes processos de DED.

Relativamente ao movimento destes sistemas, um gantry ou um braço robótico (por norma, com 6 eixos) é habitualmente utilizado. O substrato ou peça onde se deposita o material poderá estar fixo a uma mesa estática ou a um posicionador que possua um ou mais eixos de rotação [5]. A Figura 4 mostra, a título exemplificativo, a célula de fabrico aditivo de DED-LB do ISQ.

Os materiais utilizados na tecnologia de DED são maioritariamente metálicos, existindo atualmente uma grande variedade de ligas já desenvolvidas que são possíveis de processar. Isto deve-se à procura contínua proveniente das várias indústrias que utilizam esta tecnologia, como a aeroespacial, médica e automóvel, entre outras. Alguns dos materiais mais utilizados são os aços carbono, aços-ferramenta, aços inoxidáveis, ligas de titânio, ligas de alumínio, ligas de níquel, ligas de cobalto, ligas de cobre, entre outros [6]. Como referido anteriormente, o processo de DED utiliza matéria-prima sob a forma de pó ou de fio metálico. Por exemplo, no DED-LB a dimensão, forma e distribuição das partículas são variáveis importantes, tendo influência no resultado e qualidade final das peças produzidas. No entanto, é de referir, que outros processos de fabrico aditivo metálico, como a Fusão a Laser em Cama de Pó (PBF-LB, do inglês Powder Bed Fusion), são muito mais rigorosos em termos da qualidade dos pós atomizados que necessitam para o bom funcionamento do processo, enquanto o DED LB consegue utilizar pó metálico com menos restrições dimensionais, geométricas e de distribuição de partículas [7].

Entre os vários parâmetros de processo em DED, destacam-se alguns dos principais que devem ser levados em consideração para obtenção de uma peça de qualidade [3]: potência e diâmetro



FIGURA 4
Células de fabrico aditivo de DED-LB do ISQ.

do foco (DED-LB e DED EB), corrente (DED-Arc), velocidade de varrimento, taxa de alimentação da matéria-prima, características da matéria-prima, caudal dos gases de processo e estratégia de deposição.

São variados os tipos de aplicações para processos de DED:

- Deposição de revestimentos a laser em peças previamente construídas. Este tipo de aplicação é utilizado para melhorar o tempo de vida das peças de base (por exemplo, contra o desgaste) ou até conceder novas propriedades [8].

- Fabrico de peças em 3D. Face a métodos tradicionais, é uma tecnologia que proporciona várias vantagens, como a possibilidade de produzir peças multimateriais (incluindo materiais com gradiente de funcionalidade), peças com geometrias complexas (como moldes com canais de refrigeração internos) ou peças de grande volume [9, 10, 11].

- Reparação ou refabrico. O processo DED torna-se adequado mesmo para peças com geometrias complexas, onde a entrega térmica controlada permite não influenciar negativamente a microestrutura dos materiais envolvidos [12]. A reparação permite grandes poupanças financeiras e ambientais, pois anula a necessidade de produzir uma nova peça de custo elevado. Exemplos de peças já reparadas com DED são moldes, postiços, ferramentas, carris, turbinas, entre outros [6].

REFERÊNCIAS

[1] Zhai, X., Jin, L., & Jiang, J. (2022). A survey of additive manufacturing reviews. Materials Science in Additive Manufacturing, 1(4), 21. https://doi.org/10.18063/msam.v1i4.21

[2] Sandia National Laboratories, 1997, Creating a Complex Metal Part in a Day is Goal of Commercial Consortium Available from: https://www.sandia.gov/media/lens.htm [Last accessed on 2023 Dec 09].

[3] Ahn, D.-G. (2021). Directed Energy Deposition (DED) Process: State of the Art. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, 8(2), 703-742. https://doi.org/10.1007/s40684-020-00302-7

[4] ISO/ASTM 52900:2023. (2023). Manufatura Aditiva - Princípios Gerais - Terminologia. Instituto Português da Qualidade

[5] Gibson, I., Rosen, D., & Strucker, B. (2015). Directed energy deposition process. Additive manufacturing technology (pp. 245-268). Berlin: Springer.

[6] Svetlizky, D., Zheng, B., Vyatskikh, A., Das, M., Bose, S., Bandyopadhyay, A., Schoenung, J. M., Lavernia, E. J., & Eliaz, N. (2022). Laser-based directed energy deposition (DED-LB) of advanced materials. Materials Science and Engineering: A, 840, 142967. https://doi.org/10.1016/j.msea.2022.142967

[7] Azarniya, A., Colera, X. G., Mirzaali, M. J., Sovizi, S., Bartolomeu, F., St Weglowski, M., k, Wits, W. W., Yap, C. Y., Ahn, J., Miranda, G., Silva, F. S., Madaah Hosseini, H. R., Ramakrishna, S., & Zadpoor, A. A. (2019). Additive manufacturing of Ti-6Al-4V parts through laser metal deposition (LMD): Process, microstructure, and mechanical properties. Journal of Alloys and Compounds, 804, 163-191. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.04.255

[8] M. Zhong, W. Liu, Laser surface cladding: the state of the art and challenges,Proc. Inst. Mech. Eng. C: J. Mech. Eng. Sci. 224 (2010) 1041-1060, https://doi.org/10.1243/09544062JMES1782.

[9] Yan, L., Chen, Y., & Liou, F. (2019). Additive manufactur ing of functionally graded metallic materials using laser metal deposition. Additive Manufacturing, 31, 100901. https://doi. org/10.1016/j.addma.2019.100901

[10] P.R. Gradl, C.S. Protz, Technology advancements for channel wall nozzle manufacturing in liquid rocket engines, Acta Astronaut. 174 (2020) 148-158, https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2020.04.067

[**11]** P. Gradl, Principles of Directed Energy Deposition for Aerospace Applications, NASA Marshall Space Flight Center, 20 January 2021. https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20210000449/downloads/UTEP-Course%20-%20Principles%20of%20DED_Gradl_Jan2021.pdf. (Accessed 9 July 2024).

[12] C. Bremer, Automated repair and overhaul of aero-engine and industrial gas turbine components, in: Proc. ASME Turbo Expo 2005 vol. 2, Power for Land, Sea, and Air, 2005, pp. 841-846, https://doi.org/10.1115/GT2005-68193



FABRICO ADITIVO

PRODUÇÃO MAIS FLEXÍVEL E COMPETITIVA

COMPETÊNCIAS ISQ

- Avaliação e seleção de tecnologias de processo para a indústria
- Prototipagem de componentes com geometria complexa
- Qualificação de componentes, processos e pessoas
- Desenvolvimento e caracterização de novos materiais
- Simulação, modelação e otimização topológica de componentes

www.isqgroup.com | fabricoaditivo@isq.pt

ADOÇÃO DE FABRICO ADITIVO EM CADEIAS DE ABASTECIMENTO DA INDÚSTRIA DE PROCESSO: FATORES DE SUCESSO E PERSPETIVA FUTURA

Gonçalo Cardeal[1], Tobias Figueiredo[2], Inês Ribeiro[1], Marco Leite[1]
1 IDMEC, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal
2 The Navigator Company

As tecnologias de fabrico aditivo têm vindo a evoluir ao longo dos últimos anos, estando atualmente em fase de adoção em diversos sectores industriais. Dentro das aplicações mais comuns destaca-se o setor médico, nomeadamente no fabrico de implantes customizados ou o setor aeronáutico ao nível do fabrico de componentes ultraleves. Ainda que menos discutido, na literatura recente, a utilização de fabrico aditivo em componentes de substituição é uma das áreas mais promissoras de adoção destas tecnologias. O elevado potencial de customização associado à independência de ferramentas dedicadas oferece a possibilidade de descentralizar a produção de peças de substituição, trazendo-a para o local de utilização. A expectativa é que esta transição reduza a complexidade das cadeias de abastecimento e contribua para a redução de stocks de segurança. Este processo de adoção revela-se mais complexo do que inicialmente esperado. As tecnologias disponíveis, bem como os fornecedores existentes, têm limitações que condicionam o potencial de aplicabilidade em peças de substituição. O artigo presente explora os desafios atuais e perspetivas futuras de adoção de fabrico aditivo em cadeias de abastecimento de peças de substituição, através da análise do caso de estudo da Navigator Company. Numa primeira fase, o caso de estudo é utilizado para entender os desafios e fatores de sucesso de adoção de fabrico aditivo. Os dados recolhidos através de contactos com a empresa, fornecedores, e da literatura científica disponível são combinados para analisar tendências de adoção de tecnologias de fabrico aditivo.

1. INTRODUÇÃO

O fabrico aditivo (FA) é frequentemente referido pelo seu potencial revolucionário [1]. Desde a customização em massa [2], passando por modelos de negócio centrados no consumidor [3], até às cadeias de fornecimento de peças de substituição [4], prevê-se que mude o paradigma industrial. Desde a sua introdução nos anos 80, diversos investigadores têm argumentado que, por não requerer configuração específica ou ferramentas dedicadas, o FA pode ser usado para melhorar os tempos de resposta e encurtar cadeias de abastecimento [5]. Além disso, permite às empresas trabalhar com vários fornecedores, o que contribui significativamente para melhorar a resiliência e reduzir a incerteza nos prazos de entrega [6]. As características únicas do FA podem ser aproveitadas pelas empresas para reduzir o inventário de peças de substituição e, eventualmente, substituí-lo por armazéns digitais [6].

Apesar do seu elevado potencial, o FA aditivo tem limitações que são frequentemente ignoradas pela literatura técnica e científica. Uma linha de pensamento recorrente é que o FA eliminará totalmente os armazéns de peças de substituição, permitindo que as empresas fabriquem rapidamente peças quando necessário (*on-demand*). Existem algumas suposições erradas por trás desta ideia, começando pelo facto de que o FA, tal como demonstrado em vários estudos, é tecnicamente viável apenas para um número relativamente pequeno de peças de substituição. Uma parte significativa das referências de peças de substituição (SKUs) encontrados em armazéns industriais são componentes eletrónicos, conjuntos (motores, bombas, etc.) ou peças de consumo standard (parafusos, porcas, rolamentos, etc.). Tanto os componentes eletrónicos quanto as peças de consumo são geralmente padronizados e produzidos em larga escala, o que os torna mais rentáveis do que qualquer alternativa em

pequena escala. Tais componentes geralmente não representam problemas para as empresas, pois podem ser facilmente adquiridos a uma variedade de fornecedores. Mesmo dentro do grupo de peças teoricamente viáveis, algumas podem não ser geometricamente adequadas para processos de manufatura aditiva, que ainda apresentam grandes limitações, por exemplo nas dimensões máximas da peça [7].

Mais ainda, a eliminação do stock de segurança de peças de substituição apresenta riscos significativos. As empresas precisariam de criar condições para fabricar rapidamente peças no local, o que exigiria equipamentos de FA e capacidade/equipamentos de pós-processamento, ou centros de serviço locais, que não existem em larga escala. Ter equipamentos de ponta de fabrico aditivo pode não ser problemático para uma empresa de grande dimensões. No entanto, ter o número total de equipamentos de pós-processamento necessários para fabricar diferentes peças resultaria num investimento significativo. Além disso, o *know-how* necessário para implementar a produção de FA para algumas peças ainda não está presente na maioria das empresas. Note-se que alguns pós-processos podem ser exclusivos para poucas peças, tornando a sua taxa de utilização muito baixa. Neste contexto, estabelecer uma rede de fornecedores de FA, que possa responder rapidamente, e utilizá-la para otimizar os requisitos de stock de segurança é de extrema importância.

2. MÉTODOS

Para avaliar os fatores de sucesso de adoção de FA em cadeias de abastecimento de peças de substituição, este estudo foca um caso da indústria de pasta e papel, nomeadamente o da The Navigator Company. A empresa em causa iniciou o processo de adoção de FA em 2017, através da identificação de casos com potencial para reengenharia e produção por fabrico aditivo. Desde então tem vindo a explorar o potencial destas tecnologias em parceria com universidades, fornecedores e consultores externos.

A investigação conduzida segue uma metodologia tradicional de caso de estudo, através da realização de entrevistas não estruturadas, observações de campo e sessões com grupos de trabalho. Estes grupos envolveram trabalhadores das áreas de manutenção, aprovisionamento e engenharia. No total foram realizadas três visitas às instalações da empresa para acompanhar e analisar procedimentos de manutenção, aprovisionamento e gestão de armazém. Este acompanhamento foi realizado por observação dos procedimentos. Paralelamente, foram conduzidas entrevistas não estruturadas com os responsáveis de manutenção mecânica da fábrica ATF de Setúbal, da fábrica Figueira da Foz, e com três trabalhadores da manutenção. Finalmente, foram realizadas duas sessões de grupo envolvendo os diretores referidos anteriormente, técnicos de aprovisionamento e membros da alta direção da empresa. Ao longo destas sessões foram escrutinados os objetivos

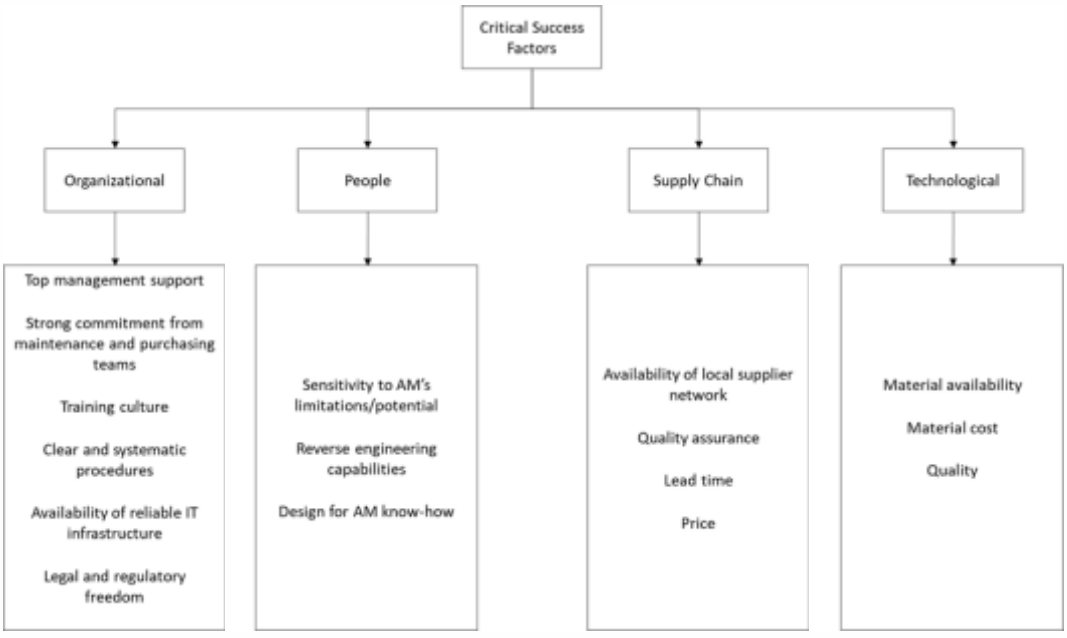


FIGURA 1
Fatores chave para a adoção de FA na cadeia de abastecimento de peças de substituição da The Navigator Company.

da empresa, a sua experiência no processo de adoção de FA, os principais desafios e a forma como entendem o potencial destas tecnologias.

3. FATORES DE SUCESSO NA ADOÇÃO DE TECNOLOGIAS DE FA NA NAVIGATOR COMPANY

A discussão seguinte baseia-se na literatura existente, bem como na análise do caso de estudo. Para o efeito desta discussão, os fatores chave de adoção são definidos como uma adaptação ao conceito de Fatores Críticos de Sucesso (CFSs), que são as áreas chave onde "as coisas devem correr bem" para o sucesso do negócio [8]. Assim, os fatores chave de adoção referem-se às áreas que são críticas para garantir o sucesso da adoção do FA. Como resultado, quatro subconjuntos de fatores chave foram identificados: Organizacionais, Pessoas, Cadeia de Fornecimento, Tecnológicos (Figura 1).

Os fatores organizacionais referem-se à mentalidade das empresas e aos ajustes necessários a nível organizacional para garantir um processo de adoção bem-sucedido. Em primeiro lugar, o processo de adoção requer tempo e dedicação dos trabalhadores em diferentes níveis, desde as equipas de manutenção até aos departamentos de aprovisionamento/compras. Com base no caso de estudo, a maioria dos trabalhadores prioriza as tarefas do dia-a-dia, compreensivelmente tendo pouca disponibilidade/interesse em empreender projetos paralelos. Este é um desafio comum em outras áreas, como a implementação de processo de melhoria contínua e manufatura lean. Apesar de afirmarem perceber o potencial do FA, não há um compromisso estruturado para identificar peças, a menos que se torne parte das suas tarefas diárias. Por esta razão, o apoio da gestão de topo é um fator crítico para o sucesso. A estratégia da empresa deve incluir equipas dedicadas ou, pelo menos, introduzir esta área como parte das tarefas/ responsabilidades diárias das equipas de manutenção/ aprovisionamento.

Ter procedimentos claros é fundamental, não só para identificar cadeias de fornecimento alternativas impulsionadas pelo FA, mas para otimizar os stocks de segurança em geral. Identificar SKUs isolados pode ser relativamente simples, mas selecionar corretamente todos aqueles com potencial, a partir de um grande armazém, pode ser complexo. Os resultados do caso de estudo industrial revelam que apenas 1% dos SKUs têm potencial, e ainda menos são viáveis para FA. Padrões de procura irregulares seja no tempo (intermitentes), em quantidade (errática) ou ambos os casos (irregular), são características fundamentais nas peças identificadas, aliado sempre a uma avaliação técnica das peças. Existem outras peças em que a viabilidade não é obvia e depende sempre de uma avaliação técnica e económica. Do ponto de vista económico é fundamental equilibrar o custo de aquisição/produção com os custos de gestão de armazém e respetivo investimento em stock de segurança [9], [10].

Ter procedimentos claros e bem estabelecidos para identificar peças, testar alternativas e mudar práticas é fundamental para uma adoção bem-sucedida. Naturalmente, isso é redundante sem dados de qualidade sobre a procura histórica e as condições da cadeia de fornecimento, o que requer uma infraestrutura digital fiável.

Finalmente, as empresas, neste caso a The Navigator Company, precisam de criar uma cultura de formação para preparar os seus trabalhadores para as particularidades das tecnologias de FA [11], o que está relacionado com a dimensão das "pessoas". A qualificação e o conhecimento da força de trabalho são fundamentais para a adoção de FA [12]. Engenheiros, técnicos e outros trabalhadores envolvidos no processo de adoção devem estar conscientes do potencial/limitações das tecnologias de FA para conduzir o processo de identificação de SKUs adequados e mapear/avaliar cadeias de abastecimento alternativas. Além disso, as empresas precisam de ter trabalhadores versados em modelação 3D e design para FA. O primeiro é frequentemente necessário devido à ausência de versões digitais das peças de reposição. O segundo, embora obviamente necessário, implica uma curva de aprendizagem. O bom design para FA tira proveito do potencial tecnológico para reduzir peso, melhorar funcionalidade (se possível) e tornar o fabrico mais eficiente em termos de recursos e tempo (para alguns exemplos, ver [13], [14]).

Alternativamente, ambas as atividades podem ser subcontratadas, o que reduz a necessidade de recursos internos, contudo, não elimina a necessidade de trabalhadores capazes de identificar peças adequadas.
A substituição dos fornecedores existentes de peças convencionais por fornecedores de FA depende da sua disponibilidade, preferencialmente na forma de uma rede local com diferentes tecnologias (por exemplo *Powder Bed Fusion ou Direct Energy Deposition)* e várias alternativas de matérias-primas, capaz de acomodar o volume de produção necessário e a

grande variedade de peças de substituição. Uma rede de fornecedores pobre é um fator negativo para a adoção. Muitas das vantagens da adoção de FA são baseadas na redução do tempo de entrega e/ou do preço de aquisição. Ter uma rede de fornecedores locais bem dimensionada é fundamental para alcançar ambos os objetivos.

Do ponto de vista tecnológico, a disponibilidade de materiais a custos competitivos é essencial para cumprir o potencial do FA. As peças estudadas até agora pela empresa são metálicas, que está amplamente disponível para processos cama de pó, como SLM. No entanto, outras indústrias podem depender de uma grande variedade de materiais, alguns dos quais não estão tão prontamente disponíveis, visto que muitos equipamentos são dedicados a apenas um material para justificar a sua rentabilidade. A coexistência de peças de substituição com materiais diferentes, requer uma rede complexa de fornecedores com diferentes tecnologias e conhecimento especializado.

4. PERSPETIVA FUTURA

O potencial de adoção de fabrico aditivo depende de vários fatores relacionados com a própria peça; fornecedores existentes; padrões de procura; e a rede de fornecedores de FA. A introdução de FA em cadeias de abastecimento de peças de substituição deve fazer parte de uma estratégia mais ampla, focada na otimização dos stocks de segurança. Essa estratégia deve considerar políticas de revisão contínua e pesquisa periódica de fornecedores alternativos, alguns dos quais podem utilizar tecnologias de manufatura aditiva.

Tão importante quanto avaliar o papel atual do FA nas cadeias de fornecimento de peças de reposição, é discutir possíveis caminhos de evolução ao longo do tempo. Comparando a literatura existente com as perceções da análise anterior, o percurso estimado para o papel do FA nas cadeias de fornecimento de peças de reposição é resumido na Figura 2. Num estudo que discute o impacto do FA nos modelos de negócio, Savolainen e Collan argumentaram que os prestadores de serviços de FA irão eventualmente evoluir para formar uma rede de fornecedores de manufatura distribuída, utilizando plataformas controladas por OEMs para facilitar a transferência de dados entre OEMs e consumidores [15]. Caso se confirme, esta evolução pode contribuir para mudar o papel do FA ao longo do tempo.

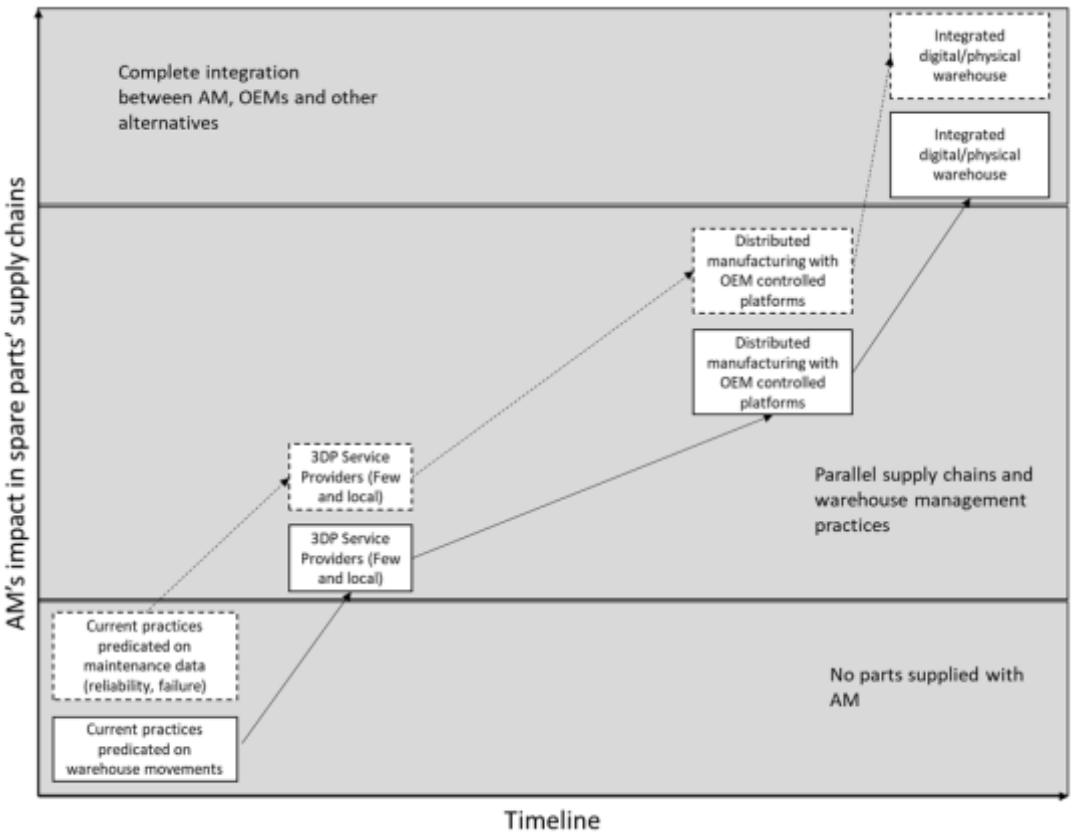


FIGURA 2
Estimativa da evolução do papel do fabrico aditivo em cadeias de abastecimento de peças de substituição. O esquema foi desenvolvido de acordo com o potencial para maximizar impactos económicos, ambientais e sociais.

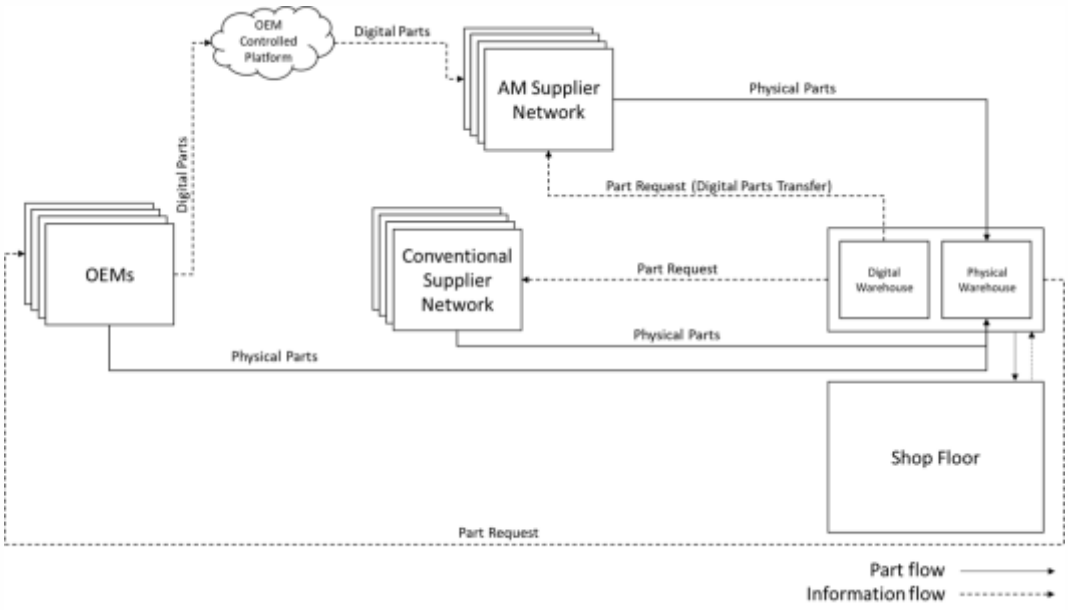


FIGURA 3
Configuração do armazém e cadeia de abastecimento digital/física de peças de substituição.

Inicialmente, as empresas identificarão peças de reposição com base em padrões de procura ou dados de fiabilidade e estabelecerão uma pequena rede de fornecedores locais. À medida que o FA se tornar mais comum como método de manufatura de peças de substituição e os OEMs começam a ser introduzidos nas cadeias de abastecimento, as redes de fornecedores evoluirão para uma rede distribuída de fabricantes, diretamente conectados aos OEMs. Finalmente, a gestão de peças de reposição evoluirá para integrar tanto fornecedores convencionais quanto fornecedores de FA, formando o armazém digital/físico.

No futuro imediato, a ausência de integração com os OEMs significa que o FA está limitado a peças de substituição identificadas pelas empresas, ficando a reengenharia também ao seu cargo; contudo, à medida que surgem plataformas de partilha de dados, os OEMs terão a opção de fornecer peças de substituição digitais. A longo prazo, o FA pode ser integrado nas cadeias de fornecimento em conjunto com outros fornecedores, formando uma rede digital de peças de reposição [4]. O objetivo geral, como exemplificado na Figura 3, é ter um armazém totalmente integrado digital/físico, conectado a uma rede de OEMs, fornecedores de peças físicas, fornecedores de peças digitais e fornecedores de FA. Dependendo das necessidades imediatas da empresa, os profissionais poderão escolher entre adquirir peças de reposição físicas diretamente do OEM ou de uma rede de fornecedores de FA.

Os fluxos de informação, representados por linhas intermitentes, representam as interações entre os *stakeholders* que não implicam transferência de peças de substituição físicas, visto que podem ser solicitações por peças digitais. Dependendo das necessidades de manutenção, a empresa pode adquirir peças diretamente dos OEMs (ou outros fornecedores) ou adquiri-las através de uma rede de fornecedores digitais. Neste último caso, a peça de substituição digital pode ser fornecida pelo OEM ou diretamente pela empresa. Embora o foco deste trabalho seja avaliar a adoção de FA, a rede de fornecedores pode ser composta por empresas que utilizam outros processos convencionais. Os armazéns digitais são particularmente interessantes no contexto da Indústria 4.0, se as empresas conseguirem aproveitar a *internet of things* (IoT). A monitorização em tempo real da condição das peças críticas, juntamente com a manutenção preditiva, pode contribuir para otimizar a previsão falha [16] e facilitar o fabrico *on demand* de peças de substituição. Se as empresas conseguirem prever com precisão as falhas, ter uma rede de fornecedores de FA poderá garantir o fabrico de peças de substituição perto da data estimada de substituição. Este nível de integração entre o planeamento/previsão de manutenção baseada na fiabilidade e as tecnologias de FA, tem potencial para aumentar o seu papel nas cadeias de abastecimento de peças de substituição.

5. CONCLUSÃO

Em termos de fatores chave de adoção, em geral, o fabrico aditivo é mais adequado para peças com padrões de procura irregulares, seja no tempo (intermitente), em quantidade

(errática) ou ambos (irregular). É também mais indicada para peças que atualmente estão sujeitas a prazos de entrega longos e pouco confiáveis, pois há uma maior margem para redução de custos diretos e indiretos. Internamente, a adoção do FA nas cadeias de abastecimento de peças de substituição requer compromisso e apoio da gestão de topo, formação das equipas de engenharia/técnicas e desenvolvimento de uma cultura de melhoria contínua focada na identificação de peças com potencial. Externamente, o caminho imediato para a adoção de FA requer acesso a uma rede de fornecedores com diferentes tecnologias e materiais de FA.

Apesar do seu potencial, o estado atual de desenvolvimento tecnológico e empresarial de FA apresenta alguns desafios que precisam de ser superados. A disponibilidade de fornecedores locais continua limitada e não há apoio dos OEMs das máquinas, o que significa que as empresas muitas vezes precisam de fazer engenharia inversas de peças para adquirir modelos digitais. No futuro, espera-se que os OEMs sejam introduzidos na equação, seja vendendo ou licenciando peças de substituição digitais através de plataformas seguras e controladas.

A partir dos resultados do caso de estudo e da literatura científica existente, espera-se que o caminho para a integração de FA comece com poucas peças dispersas, produzidas por fornecedores locais (muito à semelhança do que foi o processo na The Navigator Company). Com a adoção ao nível do mercado, o envolvimento dos OEMs e o desenvolvimento da tecnologia, este paradigma pode evoluir para a criação de soluções de cadeia de abastecimento integradas, combinando OEMs, fornecedores convencionais e redes de fornecedores de FA com vários processos e materiais. Neste contexto, a peça de substituição será vista como uma entidade que pode ser armazenada em formato físico ou digital. Dependendo das necessidades imediatas e da disponibilidade de fornecedores, as empresas terão a opção de adquirir peças fabricadas de forma convencional ou aditiva.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho é apoiado pela União Europeia no âmbito do Next Generation EU, através de uma subvenção do Acordo de Parceria do Plano de Recuperação e Resiliência (PRR) da República Portuguesa, no âmbito do projeto PRODUTECH R3 - "Agenda Mobilizadora da Fileira das Tecnologias de Produção para a Reindustrialização", visando a mobilização da indústria de tecnologias de produção para a reindustrialização do tecido industrial transformador (Projecto ref. nº 60 - C645808870-00000067).

REFERÊNCIAS

[1] B. Berman, "3-D printing: The new industrial revolution," *Bus Horiz*, vol. 55, no. 2, pp. 155-162, Mar. 2012, doi: 10.1016/J.BUSHOR.2011.11.003.

[2] B. Berman, "3-D printing: The new industrial revolution," *Bus Horiz*, vol. 55, no. 2, 2012, doi: 10.1016/j.bushor.2011.11.003.

[3] M. Bogers, R. Hadar, and A. Bilberg, "Additive manufacturing for consumer-centric business models: Implications for supply chains in consumer goods manufacturing," *Technol Forecast Soc Change*, vol. 102, pp. 225-239, Jan. 2016, doi: 10.1016/J.TECHFORE.2015.07.024.

[4] S. Chekurov, S. Metsä-Kortelainen, M. Salmi, I. Roda, and A. Jussila, "The perceived value of additively manufactured digital spare parts in industry: An empirical investigation," *Int J Prod Econ*, vol. 205, pp. 87-97, Nov. 2018, doi: 10.1016/J.IJPE.2018.09.008.

[5] M. Bogers, R. Hadar, and A. Bilberg, "Additive manufacturing for consumer-centric business models: Implications for supply chains in consumer goods manufacturing," *Technol Forecast Soc Change*, vol. 102, pp. 225-239, Jan. 2016, doi: 10.1016/J.TECHFORE.2015.07.024.

[6] S. Chekurov, S. Metsä-Kortelainen, M. Salmi, I. Roda, and A. Jussila, "The perceived value of additively manufactured digital spare parts in industry: An empirical investigation," *Int J Prod Econ*, vol. 205, pp. 87-97, Nov. 2018, doi: 10.1016/j.ijpe.2018.09.008.

[7] B. T. Ferreira, A. A. de Campos, R. Casati, A. Gonçalves, M. Leite, and I. Ribeiro, "Technological capabilities and sustainability aspects of metal additive manufacturing," *Progress in Additive Manufacturing*, 2023, doi: 10.1007/s40964-023-00534-4.

[8] J. F. Rockart, "Engaging Top Management in Information Technology," *Harvard Business Review*, Mar. 1979.

[9] G. Cardeal, D. Sequeira, J. Mendonça, M. Leite, and I. Ribeiro, "Additive manufacturing in the process industry: A process-based cost model to study life cycle cost and the viability of additive manufacturing spare parts.," *Procedia CIRP*, vol. 98, pp. 211-216, Jan. 2021, doi: 10.1016/J.PROCIR.2021.01.032.

[10] G. Cardeal, M. Leite, and I. Ribeiro, "Decision-support model to select spare parts suitable for additive manufacturing," *Comput Ind*, vol. 144, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.compind.2022.103798.

[11] R. Prabhu, J. Bracken, C. B. Armstrong, K. Jablokow, T. W. Simpson, and N. A. Meisel, "Additive creativity: investigating the use of design for additive manufacturing to encourage creativity in the engineering design industry," *https://doi.org/10.1080/21650349.2020.1813633*, vol. 8, no. 4, pp. 198-222, Oct. 2020, doi: 10.1080/21650349.2020.1813633.

[12] S. Mellor, L. Hao, and D. Zhang, "Additive manufacturing: A framework for implementation," *International Journal of Production Economics*, vol. 149, 2014, doi: 10.1016/j.ijpe.2013.07.008.

[13] T. Markovits and B. Szederkényi, "Investigation of generative design for powder bed fusion technology in case of Formula Student race car components using Ti6Al4V alloy," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 80, pp. 220-231, Aug. 2022, doi: 10.1016/J.JMAPRO.2022.05.058.

[14] J. D. López-Castro, A. Marchal, L. González, and J. Botana, "Topological optimization and manufacturing by Direct Metal Laser Sintering of an aeronautical part in 15-5PH stainless steel," *Procedia Manufacturing*, vol. 13, pp. 818-824, 2017, doi: 10.1016/j.promfg.2017.09.121.

[15] J. Savolainen and M. Collan, "How Additive Manufacturing Technology Changes Business Models? - Review of Literature," Mar. 01, 2020, *Elsevier B.V.* doi: 10.1016/j.addma.2020.101070.

[16] S. Keivanpour and D. A. Kadi, "The effect of 'Internet of things' on aircraft spare parts inventory management," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 52, no. 13, pp. 2343-2347, Sep. 2019, doi: 10.1016/J.IFACOL.2019.11.556.

TRABALHAR O FABRICO ADITIVO

ENTREVISTA COM FILIPPO BERTO

O nome Filippo Berto é bem conhecido para quem trabalha os temas da mecânica da fratura e da fadiga. Este professor da Universidade La Sapienza de Roma é simultaneamente vice-presidente da Sociedade Europeia de Integridade Estrutural e, em 2021, foi agraciado com a Ordem da Estrela de Itália, juntamente com vários prémios da Sociedade Europeia de Integridade Estrutural. Mais do que isso, é fundador e presidente do Comité Técnico TC15 da ESIS sobre Integridade Estrutural de Componentes Fabricados por Fabrico Aditivo. A razão por parte desta decisão prende-se com o interesse crescente que Filippo Berto começou a notar, por volta de 2015, no tópico do fabrico aditivo, com resultados muito promissores a serem publicados. "A principal questão para as aplicações de engenharia é o comportamento à fratura e à fadiga destes novos materiais, pelo que propus a criação deste comité técnico que considerei ser muito útil para a comunidade europeia e mundial", constata.

Mas o papel de Filippo Berto não se restringe ao que já foi mencionado. Sob a organização do ESIS/TC15 foram organizadas três conferências europeias (série de conferências ESIAM) sobre o tema da integridade estrutural de componentes fabricados por fabrico aditivo. Isto porque, como explica Filippo Berto o TC15 destina-se a estudar o comportamento estrutural de materiais fabricados aditivamente e a série de conferências ESIAM está perfeitamente alinhada com este objetivo, dando a possibilidade aos investigadores de todo o mundo de apresentarem os seus próprios resultados inovadores sobre o tema, trocando ideias e desenvolvimentos recentes. Isto é muito importante para transferir os nossos conhecimentos para aplicações reais. São tema e assim que têm de ser desenvolvidos, comunicados e assim partilhados entre a comunidade.

A fadiga não é um tema menor. Muito pelo contrário. E a atribuição, por parte do Conselho Europeu de Investigação (ERC), de 2,5 milhões de euros ao projeto ButterFly, coordenado pelo professor, é um exemplo claro disso mesmo. Para se ter uma ideia, o projeto ButterFly centra-se na conceção de estruturas super-resistentes sujeitas a tensões cíclicas (fadiga) e no estudo dos processos de fabrico mais adequados para produzir essas estruturas de forma eficiente (Fonte: https://www.uniroma1.it/en/notizia/sapienzas-butterfly-project-wins-erc-advanced-grant-2022).

Como explica Filippo Berto, a ideia principal do projeto é combinar três ingredientes principais: bio-inspiração, métodos baseados em dados e métodos de fabrico avançados (entre os quais o fabrico aditivo). De forma sucinta o objetivo final é conseguir conceber estruturas inovadoras e super-resistentes sob cargas cíclicas. Isto porque "O fabrico aditivo permite aumentar gratuitamente a complexidade da geometria, o que constitui a chave da sua aplicação neste projeto".

Este não é o primeiro projeto em que o professor está envolvido. Questionado sobre um projeto anterior sobre fabrico aditivo que tenha coordenado a resposta foi imediata: Projeto europeu Twinning SIRAMM, que contou com a coordenação do prof. Liviu Marsavina, da Universidade de Timisoara, e que envolveu a Universidade de Belgrado, a Universidade Norueguesa de Ciência e Tecnologia de Trondheim, a Universidade de Parma e a Universidade de Brno. Projeto que, acrescenta, tinha como objetivo trocar conhecimentos



sobre a integridade estrutural de materiais poliméricos e metálicos obtidos por meio de técnicas de fabrico aditivas. No final os resultados permitiram "criar uma forte equipa europeia que trabalha em Fabrico Aditivo, potenciando uma nova geração de jovens investigadores e estudantes que são o futuro da nossa sociedade e podem fazer avançar a investigação nestas direções desafiantes".

No decorrer da sua carreira, além de coordenar projetos aliciantes e de ensinar futuras gerações, Filippo Berto também tem publicados diversos artigos, sempre com o objetivo de explicar os contributos e disseminar o conhecimento no domínio do fabrico aditivo. Sobre isto Filippo Berto limita-se a referir que "com o meu grupo, tentámos alargar as abordagens locais da fadiga à conceção de componentes de fabrico aditivo". O professor revela que estavam interessados "nas abordagens locais baseadas na densidade de energia de deformação, que têm uma série de vantagens em relação às abordagens baseadas na tensão". Sobre o seu papel em específico aponta que o seu contributo para o fabrico aditivo tem sido a criação de ferramentas para avaliar a vida à fratura e à fadiga dos componentes fabricados aditivamente. Afinal, "esta é a chave para aplicações reais".

PARA ONDE VAI O FUTURO

Falar de ciência é falar de investigação, mas também de inovação, de tendência, de futuro. Sobre os últimos avanços e tendências emergentes no fabrico aditivo, a opinião do professor foca-se no papel fundamental desempenhado pelas melhorias que temos na capacidade de imprimir componentes de alta qualidade. "A tendência é realmente promissora, com a possibilidade de controlar as densidades relativas, as composições, etc. Isto será muito importante para aplicações futuras. É difícil dizer até onde iremos, mas penso que temos um caminho brilhante à nossa frente com muitas novas possibilidades e ferramentas. Os desenvolvimentos são impressionantes ano após ano", afirma Filippo Berto, acrescentando que um dos resultados mais interessantes foi publicado pelo Prof. Robert Ritchie na revista Nature.

"Centra-se na elevada resistência à fadiga de uma liga de titânio obtida através da impressão 3D quase sem defeitos", explica, acrescentando que os autores "reconstroem uma microestrutura de fabrico aditivo quase sem defeitos na liga de titânio Ti-6Al-4V através do desenvolvimento de uma técnica de processamento de Net-AM, por meio de uma compreensão do assincronismo da transformação de fase e do crescimento de grãos. Ritchie e o seu grupo identificam a resistência à fadiga de tais microestruturas de fabrico aditivo e mostram que estas conduzem a um elevado limite de fadiga, de cerca de 1 GPa, excedendo a resistência à fadiga de todas as ligas de titânio incluindo as forjadas".

Quanto aos desafios que os investigadores enfrentam, o professor aponta que a principal limitação do fabrico aditivo em aplicações estruturais continua a ser a resistência à fadiga, que desempenha um papel fundamental, sendo a causa da falha de mais de 90% dos componentes. "Uma limitação do fabrico aditivo é certa-mente os pós-processamentos necessários aplicar para se obter um elevado desempenho à fadiga. Os investigadores estão a estudar diferentes pós-processamentos que podem ser baratos e fáceis de aplicar", constata.

DESENVOLVIMENTO DE NOVOS *SCAFFOLDS* MULTIMATERIAL PARA RECONSTRUÇÃO MANDIBULAR

Pedro Rebolo[1,*], Bruno Areias[1], Nilza Ramião[1], Jaime Filipe Correia[1], Renato Natal[1,2] e Marco Parente[1,2]

1 INEGI - Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial, Porto, Portugal
2 DEMec, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal
Correspondência*: Pedro Rebolo prebolo@inegi.up.pt

A reconstrução mandibular após uma ressecção segmentar é uma tarefa complexa que continua a ser um desafio clínico, especialmente em grandes defeitos ósseos. A implantação de scaffolds surge como uma estratégia promissora; no entanto, ainda há uma falta de conhecimento sobre como é que um scaffold deve ser projetado para ajudar a regeneração óssea. Este estudo investiga a influência do design do scaffold e das suas propriedades mecânicas nas condições biomecânicas induzidas na reconstrução mandibular. Um modelo de elementos finitos da mandíbula humana foi desenvolvido e um cenário com um grande defeito ósseo foi simulado, com carga fisiológica pós-operatória e condições de fronteira adequadas. O defeito foi então preenchido com um scaffold e estabilizado com uma placa de fixação. Para estudar o efeito da rigidez do dispositivo de fixação nas condições biomecânicas induzidas na placa e nos poros do scaffold, foram testados dois materiais diferentes para o dispositivo de fixação, nomeadamente uma liga de titânio Ti-6Al-4V e um ácido poliláctico (PLA). Dois tipos de modelos de distribuição de material no scaffold foram estudados. O primeiro modelo era um scaffold 100% baseado em hidrogel, enquanto o segundo tipo era um modelo multimaterial onde o scaffold foi dividido em três partes de volume igual: no centro, foi utilizado um material de hidrogel e, nas extremidades, um material cerâmico. Não foi prevista uma falha mecânica nos dispositivos de fixação para nenhuma das configurações investigadas. Como esperado, o dispositivo de fixação de PLA induziu maiores deformações na região de cicatrização do que o dispositivo de fixação de titânio; no entanto, as deformações com o dispositivo de fixação de titânio foram muito baixas. A mudança na distribuição do material do scaffold levou a diferenças consideráveis nas deformações mecânicas na região de cicatrização. Os scaffolds de hidrogel resultaram em baixas deformações em toda a região de cicatrização quando comparados com o scaffold multimaterial. Em conclusão, uma abordagem de scaffold multimaterial fornece um ambiente biomecânico adequado para suportar a regeneração óssea em grandes defeitos ósseos mandibulares. No entanto, o dispositivo de fixação tem uma grande influência nas condições mecânicas dentro do scaffold, o que pode influenciar o resultado da cicatrização.

PALAVRAS-CHAVE
ELEMENTOS FINITOS, REGENERAÇÃO ÓSSEA, ESTRUTURA MULTIMATERIAL, BIOMECÂNICA, MECANO-BIOLOGIA

1 INTRODUÇÃO

A reconstrução mandibular devido a defeitos ósseos, fraturas ou resseções segmentares devido a tumores ou osteonecrose ainda é um desafio na cirurgia maxilofacial (Shaw et al., 2004; Evans et al., 1995; Isler et al., 2018; Rendenbach et al., 2018). Esses defeitos podem comprometer a mecânica e a função da mandíbula, como funções mastigatórias básicas e deglutição, articulação da fala e funções fonéticas, além da estética facial (Orassi et al., 2021a; Rendenbach et al., 2018). Para manter a mobilidade da língua e restaurar a inervação da área afetada, é necessária a restauração da continuidade óssea da mandíbula (Rana et al., 2011).

O tratamento preferido para a reconstrução mandibular após resseção segmentar continua a ser o retalho livre de fíbula com fixação de titânio. No entanto, o procedimento apresenta muitas limitações. Como cada paciente é único, é necessário um planeamento e cirurgia individualizados, sem um protocolo geral

aceite ou um conjunto de diretrizes com recomendações sobre a conduta ideal pré-operatório, intra-operatório e pós-operatório do retalho (Rendenbach et al., 2018; Kansy et al., 2014). Outro risco deste tipo de tratamento é a funcionalidade do local doador após a colheita do retalho livre da fíbula. O desempenho pós-operatório do membro inferior diminui com impacto significativo nas atividades diárias, sendo equivalente à perda de sete anos de um indivíduo saudável e em forma (Rendenbach et al., 2016). Outros tratamentos para defeitos mandibulares incluem o uso de retalho microvascular autólogo livre, placas em ponte e disção osteogénica e enxertos ósseos, embora exista limitações nestes tratamentos, como disponibilidade limitada, morbidade no local doador, tempo prolongado de operação e incompatibilidade do enxerto.

Métodos alternativos de tratamento para a reconstrução mandibular estão a ser atualmente investigados. Tecnologias modernas, como a impressão 3D, são consideradas revolucionárias para o tratamento de defeitos ósseos na área maxilofacial (Zhang et al., 2019; Daniels et al., 2021; Tatullo et al., 2019).
Investigação biomédica em reconstrução mandibular é, atualmente, focada no uso de biomateriais inovadores com características específicas que podem ser usadas na cicatrização e reconstrução de grandes defeitos ósseos (Khodakaram-Tafti et al., 2018; Liu et al., 2021).
Vários estudos investigaram o potencial de *scaffolds* para reconstrução mandibular segmentar. Estudos in vivo em animais utilizando *scaffolds* de cerâmica à base de fosfato de cálcio mostraram resultados promissores na formação óssea, sendo relatada a presença de sangue nas células dos tecidos ósseos circundantes como muito importante (Vdoviaková et al., 2023). Estudos in vivo em animais usando *scaffolds* de hidroxiapatita e atelocolágeno também mostraram que esses tipos de *scaffolds* proporcionam um ambiente ideal para a transferência, adeão, migração e crescimento de osteoblastos (Taha et al., 2023).

Sabe-se que as condições biomecânicas influenciam o resultado da cicatrização óssea (Claes and Heigele, 1999; Orassi et al., 2021 a,b; Ruf et al., 2022, 2024). No entanto, para defeitos maiores, há uma redução nas deformações mecânicas (Mehta et al., 2012; Pobloth et al., 2018a). Estudos computacionais investigaram as condições mecânicas dentro dos poros dos *scaffolds* e as relacionaram com o processo de regeneração óssea (Rosa et al., 2023). Modelos *in silico* para reconstrução mandibular foram usados para determinar o ambiente biomecânico para a formação óssea, embora esses modelos tenham sido principalmente usados para mini-placas (Orassi et al., 2021a,b; Ruf et al., 2022, 2024).

Este estudo tem como objetivo investigar o potencial de um *scaffold* multimaterial para induzir um ambiente biomecânico favorável para a formação óssea num grande defeito mandibular. Para esse fim, foram usadas dois modelos de *scaffold*, um modelo de hidrogel e um modelo multimaterial composto de material à base de fosfato de cálcio cerâmico e hidrogel.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 MORFOLOGIA DO *SCAFFOLD*

A arquitetura do *scaffold* foi obtida utilizando uma combinação de código MATLAB, para gerar um arquivo gcode, e o Blender (Blender Foundation, Países Baixos). O uso do MATLAB proporciona liberdade criativa na arquitetura do *scaffold*, permitindo a obtenção de um *scaffold* personalizado com mais facilidade. A morfologia do *scaffold* é alinhada com a superfície cortada da mandíbula, e sua altura é limitada pela altura da mandíbula. Esta morfologia é gerada utilizando um script em MATLAB onde o arquivo .stl do contorno do *scaffold* é lido, uma linha virtual intersecta o arquivo .stl do *scaffold* e os pontos de interseção são escritos num arquivo de texto. O arquivo gcode obtido é então importado para o Blender para gerar a forma 3D do scaffold. Finalmente, um novo arquivo .stl é exportado.

A porosidade do *scaffold*, P , foi determinada pela Equação (1) (Soufivand et al., 2020), onde *VC* é o volume da forma sólida que possui o contorno do *scaffold*, e *VS* é o volume do próprio *scaffold*.

$$P = 1 - \frac{Vs}{Vc} x\,100 \qquad (1)$$

O *scaffold* estudado possui uma deposição ortogonal dos filamentos, onde *VC* = 11340.6 mm³ e *VS* = 3889.0 mm³, o que se traduz numa porosidade de 65.7% usando a Equação (1). A Figura 1 mostra a arquitetura do scaffold.

2.2 DISTRIBUIÇÃO DE MATERIAL NO *SCAFFOLD*

O *scaffold* apresenta dois tipos de distribuição de material. O primeiro *scaffold* é composto exclusivamente por hidrogel e o segundo

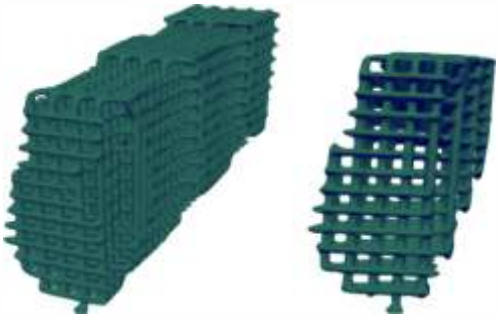


FIGURA 1
Arquitectura do scaffold

scaffold é composto por dois terços de material cerâmico e um terço de material hidrogel, com o material hidrogel distribuído na zona do *scaffold* e o material cerâmico distribuído nas extremidades do scaffold, tendo as três regiões aproximadamente o mesmo volume, conforme mostrado na Figura 2.

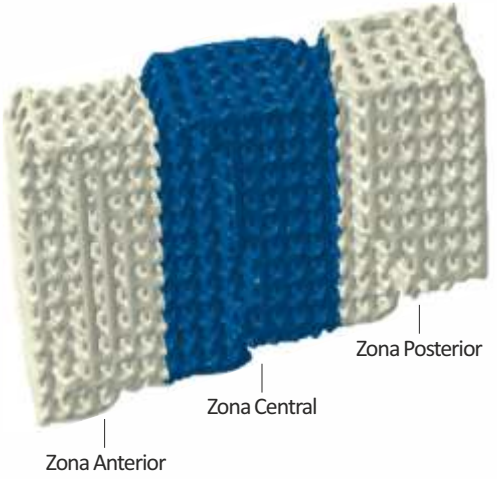


FIGURA 2
Distribuição do material no scaffold multimaterial. O material cerâmico é representado a azul, enquanto o hidrogel é representado a branco.

2.3 MODELO DE ELEMENTOS FINITOS

Uma tomografia computadorizada de feixe cónico ou tomografia computorizada volumétrica (*cone-beam computed tomography*) de um crânio humano de um indivíduo do sexo masculino com uma idade de 20 anos foi realizada em modo axial, com um tamanho de *voxel* de 0,4 mm³ (ProMax, Planmeca, Finlândia). A segmentação do material da mandíbula completamente dentada foi realizada no software Amira 6.0.1 (Zuse Institute Berlin, Alemanha), rotulando os tecidos ósseos cortical e trabecular. Após a segmentação, uma malha primária foi atribuída aos ossos segmentados. Os ossos foram então exportados como um objeto .stl para o *software* 3D-CAD *SolidWorks* 2023 para realizar uma ressecção virtual da mandíbula. Esta ressecção virtual foi feita no lado esquerdo da mandíbula, indo do ângulo mandibular até ao canino esquerdo. O espaço resultante tem um comprimento de 4 cm. Também foram feitos furos na mandíbula para fixar o dispositivo de fixação na mandíbula. A secção da mandíbula obtida foi então importada para o Abaqus/CAE (Dassault Systèmes Simulia Corp., Estados Unidos) e discretizada com elementos tetraédricos lineares (C3D4).

O dispositivo de fixação pode ser dividido em duas secções, a placa e a gaiola. A placa foi projetada usando o *software* 3D-CAD *SolidWorks* 2023 (Dassault Systèmes, França). Um dos extremos da placa tem um formato em Y, enquanto o outro é um extremo linear típico. A placa tem uma espessura de 3 mm e o orifício para o parafuso tem um diâmetro de 2,7 mm. Anexada à placa, há uma gaiola com espessura de 0,5 mm, que é parcialmente envolvida ao redor do *scaffold* para fornecer suporte mecânico e manter o *scaffold* no lugar durante a regeneração óssea. A gaiola específica do paciente foi projetada usando a superfície externa do segmento ósseo removido. A gaiola foi então importada para o *Meshlab*, onde os orifícios na estrutura foram criados utilizando a ferramenta *Poisson Disk Sampling*. Esses orifícios permitem a passagem de nutrientes, além de reduzir o peso da estrutura. Ambas as secções foram discretizadas usando o *Meshmixer* (*Autodesk,* Estados Unidos) com uma malha triangular linear 3D, e um comprimento de aresta de 0,5 mm. Este modelo foi então importado para o software comercial Abaqus/CAE (Dassault Systèmes Simulia Corp., Estados Unidos) e a malha triangular foi convertida em uma malha tetraédrica linear (tipo de elemento C3D4). O dispositivo de fixação completo é mostrado na Figura 3.

Parafusos bicorticais de vários comprimentos (11, 13, 15 e 17 mm) foram usados para fixar o dispositivo de fixação na mandíbula. Entre o dispositivo de fixação e os parafusos, e entre os tecidos ósseos mandibulares e os parafusos foram aplicadas restrições de ligação, conforme visto na literatura (Orassi et al., 2021b). Restrições de ligação também foram aplicadas entre o *scaffold* e os ossos trabecular e cortical.

2.4 CONDIÇÕES DE FRONTEIRA E CARGAS

Foi escolhido uma contração unilateral como o único cenário a ser testado, uma vez que vários estudos (Korioth et al., 1992; Lakatos et al., 2014; Lovald et al., 2009) relataram que a oclusão contralateral dos molares induz a maior quantidade de solicitação mecânica e,



FIGURA 3
Dispositivo de fixação criado para o estudo

portanto, representa um cenário crítico de contração. Para este estudo específico, foi simulado uma contração unilateral do lado direito. Seguindo o método utilizado por Orassi et al. (2021b), o deslocamento vertical foi restrito no grupo de dentes primeiro molar-segundo pré-molar. Os condilos foram assumidos como trancados na cavidade glenoidal e, portanto, restritas em todos os graus de liberdade.

Com base no estudo realizado por Steffen et al. (2023), a média da força máxima de mordida pós- operatória para pacientes submetidos à reconstrução mandibular foi de 131,5 N. A magnitude das forças musculares foi reduzida para 20% das forças musculares máximas relatadas por Nelson (1986), exceto para o masseter superficial esquerdo e o masseter profundo esquerdo, que foram reduzidos para 10% da força máxima, para se adaptar às foças pós-operatórias, que leva a uma força de mordida de 115 N. Os valores considerados de percentagem da magnitude máxima da força foram escolhidos com base no tamanho e na localização do defeito mandibular. Estas condições de carga pós-operatória foram aplicadas simulando a contração dos músculos masseter superficial (MS), masseter profundo (MP), temporal anterior (TA), temporal medial (TM), temporal posterior (TP), pterigoide medial (PtM) e pterigoide lateral inferior (PtI). As direções dos vetores de força são baseadas no trabalho realizado por Korioth et al. (1992).

Todas as condições de carga e de fronteira considera-das são apresentadas na Figura 4. As forças musculares pós-operatórias, bem como as direções dos vetores de força, são representadas na Tabela 1.

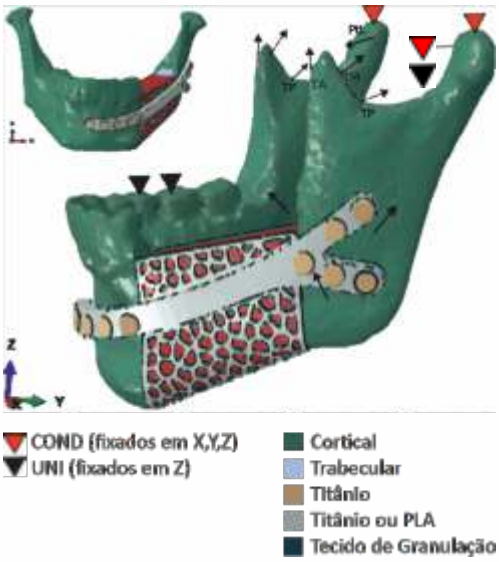


FIGURA 4
Condições de carga e de fronteira utilizadas no modelo numérico durante a contração unilateral (UNI) da mandíbula. A força de mordida foi simulada restringindo o deslocamento vertical na oclusão e os condilos nos 6 graus de liberdade.

2.5 PROPRIEDADES DOS MATERIAIS

Foram atribuídas propriedades isotrópicas a todos os materiais. Para o dispositivo de fixação, dois tipos de material foram utiliza-dos. Assumiu-se uma tensão de cedência da liga de titânio de 880 MPa e, para o PLA, a tensão de cedência foi assumida como 70 MPa. Propriedades isotrópicas também foram atribuídas ao volume de tecido, modelado como tecido de granulação, que representa o hematoma formado após a ressecção. As propriedades desse tecido de granulação foram retiradas do trabalho realizado por Checa et al. (2011).

O hidrogel e cerâmico de fosfato de cálcio (CaP) usados no *scaffold* foram desenvolvidos

TABELA 1
Cargas e cossenos das direções dos grupos musculares para a contração unilateral na mandíbula humana

Grupo Muscular Mandibular	Força Muscular Máxima (N)	Força Muscular Pós-Operativa (N)	Cosseno da Direcção X		Y	Z
			Direito	Esquerdo		
Masseter Superfical	190.4	19.04/38.08	-0.207	0.207	-0.419	0.884
Masseter Profundo	81.6	8.16/16.32	-0.546	0.546	0.358	0.758
Temporal Anterior	158.0	31.60	-0.149	0.149	-0.044	0.988
Temporal Medial	95.6	19.12	-0.222	0.222	0.500	0.837
Temporal Posterior	75.6	15.12	-0.208	0.208	0.855	0.474
Pterigoide Medial	174.8	34.96	0.486	-0.486	-0.373	0.791
Pterigoide Medial	66.9	13.38	0.630	-0.630	-0.757	-0.174

empregando métodos estabelecidos em estudos anteriores (Kimsal et al., 2011; Torres et al., 2016). A norma para reconstrução de tecido ósseo são os cerâmicos de fosfato de cálcio (CaP), devido às suas excelentes propriedades osteocondutivas e à sua similaridade composicional com o osso.

Todas as propriedades dos materiais utilizados no modelo numérico estão presentes na Tabela 2.

2.6 ESTUDO DE CONVERGÊNCIA DE MALHA

Um estudo de convergência de malha foi realizado na região de cicatrização (tecido de granulação + *scaffold*), pois é o foco principal deste estudo. Três tamanhos de malha diferentes foram usados neste estudo de convergência. A malha A é a mais fina, com um total de 7.180.810 elementos, a malha B tem 4.843.581 elementos, e a malha C, a mais grosseira, com 4.371.508 elementos. Um módulo de elasticidade de 16 kPa foi escolhido para o *scaffold* com um coeficiente de Poisson de 0,3. Esses valores foram baseados em ensaios anteriores do material de hidrogel. Um deslocamento de 1 mm foi aplicado ao topo (zona posterior) do *scaffold*, e a base (zona anterior) do *scaffold* foi fixada. As tensões de von Mises e as deformações do *scaffold* e do tecido de granulação foram comparadas entre as três malhas. A malha B resultou em tensões e deformções comparáveis à malha mais fina (malha A), com um erro relativo de 1% em relação às tensões de von Mises e um erro relativo de 2% para a deformação. Portanto, a malha B foi escolhida para o restante do estudo.

3 RESULTADOS

3.1 TENSÕES DE VON MISES NO DISPOSITIVO DE FIXAÇÃO

A distribuição de tensões de von Mises e os valores máximos para a liga de titânio Ti-6Al-4V e para o polímero PLA são mostrados na Figura 5. Em ambos os casos, a tensão máxima é inferior à tensão de cedência correspondente, o que significa que ambos os materiais trabalham na região elástica. O dispositivo de fixação feito de titânio apresenta um melhor desempenho mecânico, uma vez que o valor máximo de tensão de von Mises foi em torno dos 11% da tensão de cedência do titânio, enquanto no dispositivo de fixação de PLA, a tensão máxima de von Mises ficou em torno de 35% da tensão de cedência do PLA. Os valores de tensão de von Mises no dispositivo de fixação foram semelhantes tanto para um *scaffold* de hidrogel quanto para um *scaffold* multimaterial.

TABELA 2
Propriedades isotrópicas dos materiais atribuídos aos tecidos ósseos mandibulares, volume de fratura, implante e scaffolds.

Material	Módulo Elástico, E (MPa)	Coeficiente de Poisson, (-)
Cortical	*15000*	*0.30*
Trabecular	*300*	*0.30*
Titânio	*110000*	*0.34*
PLA	*3500*	*0.36*
Tecido de Granulação	*0.2*	*0.167*
Hidrogel	$25{\cdot}10^{-3}$	*0.45*
Cerâmico	*150*	*0.3*

3.2 INFLUÊNCIA DA RIGIDEZ DE FIXAÇÃO NA REGIÃO DE CICATRIZAÇÃO

Na região de cicatrização, e utilizando um *scaffold* formado exclusivamente por hidrogel, o dispositivo de fixação de PLA induziu deformações principais absolutas principalmente entre os 0,2-0,5%, com a mediana a estar nos 0.31%. O dispositivo de fixação de titânio induziu deformações principais absolutas entre os 0,02-0,07% com o seu valor mediano a estar nos 0.04%.

3.3 INFLUÊNCIA DO MATERIAL DO *SCAFFOLD* NA REGIÃO DE CICATRIZAÇÃO

Na Figura 6, é mostrada a distribuição das deformações de tração e compressão na região de cicatrização para os dois tipos de dispositivos de fixação com as duas configurações de *scaffold*, hidrogel e de multimaterial. O dispositivo de fixação de PLA apresenta uma melhor distribuição das deformações ao longo da região de cicatrização, enquanto no dispositivo de fixação de titânio, as deformações estão principalmente concentradas na zona posterior, com a zona central da região de cicatrização apresentando um valor quase nulo. O dispositivo de fixação de PLA mostra que na região posterior, as deformacões de compressão e tração são maiores nas regiões inferior e superior, respectivamente, devido a uma combinação de movimentos de flexão e torção. Há uma inversão na posição das deformações de compressão e tração dentro da região de cicatrização no centro e na região anterior, com as deformações de compressão localizadas na região superior e as deformações de tração localizadas na região inferior.
Relativamente aos resultados do *scaffold* multimaterial, usando o dispositivo de fixação de titânio, os valores medianos para as zonas posterior, central e anterior da região de cicatrização são entre 0,009%, 0,085% e 0,004%, respectivamente. O uso do dispositivo de fixação de PLA traz valores medianos para as zonas regiões posterior, central e

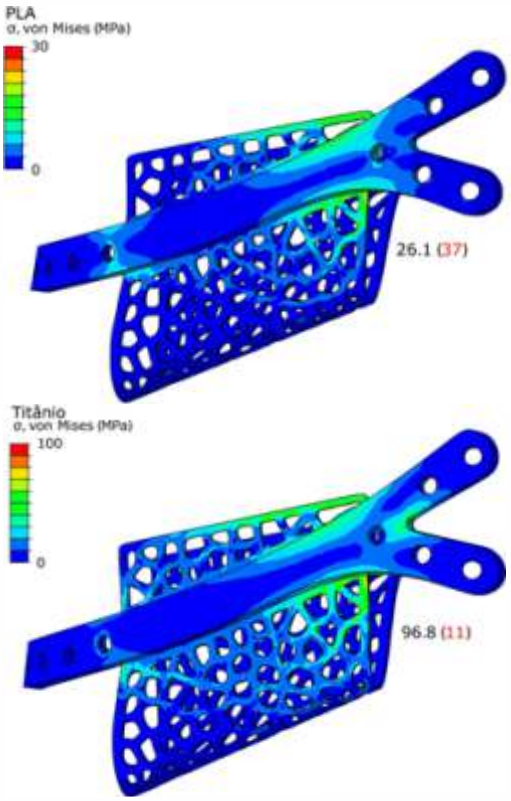


FIGURA 5
Distribuição e valores máximos (em MPa) da tensão de von Mises no dispositivo de fixação para os dois tipos material de fixação. Entre parênteses, o valor máximo como percentagem da tensão de cedência do respetivo material.

anterior da região de cicatrização de 0,04%, 0,68% e 0,015%, respectivamente.

4 DISCUSSÃO

Os *scaffolds* surgem como uma estratégia promissora para o tratamento de grandes defeitos segmentares da mandíbula; no entanto, a influência do design do *scaffold* nas condições biomecânicas induzidas na região de cicatrização ainda é desconhecida.
O ambiente biomecânico induzido pelo *scaffold* é importante, pois deve induzir deformações mecânicas benéficas na região de cicatrização para que a formação óssea possa ocorrer (Rendenbach et al., 2019; Pobloth et al., 2018b). Para avaliar esse ambiente, foi empregada uma análise de elementos finitos.

De acordo com a literatura, *scaffolds* com uma porosidade entre 50% e 80% têm um claro benefício para imitar a matriz extracelular do osso nativo (Liang et al., 2019).

A arquitetura concebida para o scaffold tem um valor de porosidade semelhante (66%), valor que está na faixa de valores de porosidade relatados por Liang et al. (2019).

Os *scaffolds* de titânio são normalmente usados para grandes defeitos ósseos. No entanto, esses tipos de scaffolds não são biodegradáveis, o que significa que, após cicatrização, o *scaffold* permanece. Uma maneira de superar esse problema é usar materiais biodegradáveis. Biomateriais à base de fosfato de cálcio estão estabelecidos na cirurgia maxilofacial e são vantajosos na medicina regenerativa ou reconstrutiva (Vdoviaková et al., 2023). Os materiais utilizados foram desenvolvidos pela Universidade de Aveiro (UAVR) para o propósito do projeto. A distribuição do material no *scaffold* multimaterial foi escolhida de modo que o material cerâmico estivesse em contacto com o osso existente, para que houvesse uma melhor transmissão das deformações mecânicas ao longo da região de cicatrização.

As forças dos músculos mandibulares foram reduzidas consistentemente para uma força de mordida pós-operatória para simular as condições biomecânicas após a cirurgia (Steffen et al., 2023). Utilizando o método de Orassi et al. (2021b) e reduzindo a força muscular máxima para 20%, a força de mordida obtida excedeu a foça relatada por Steffen et al. (2023). Como a ressecção mandibular removeu uma grande secção óssea do lado esquerdo da mandíbula, foi aplicada uma redução da foça muscular para 10% nos grupos musculares MS e MP. Com essa redução, a força de mordida alcançou resultados comparáveis aos resultados obtidos por Steffen et al. (2023).

O scaffold foi simulado com dispositivos de osteossíntese utilizando uma liga de titânio tradicional, Ti-6Al-4V, e PLA. A influência do modelo de material utilizado, um *scaffold* totalmente de hidrogel ou uma combinação de materiais cerâmicos e hidrogel, nas deformações mecânicas dentro da região de cicatrização foi investigada. Foi relatado que as deformações mecânicas influenciam a regeneração óssea na região de cicatrização, com níveis de deformação abaixo de 15% ($e < 15\%$) sendo descritos como benéficos em ossos longos (Claes and Heigele, 1999; Pobloth et al., 2018b; Duda et al., 2023). No entanto, como mencionado anteriormente, as deformações mecânicas em grandes defeitos são menores (Mehta et al., 2012; Pobloth et al., 2018a).

As deformações absolutas na região de cicatrização são maiores com a fixação em PLA do que com o dispositivo de fixação em liga de titânio (Figura 5), sendo as deformações 6 a 8 vezes maiores ao usar o dispositivo de fixação

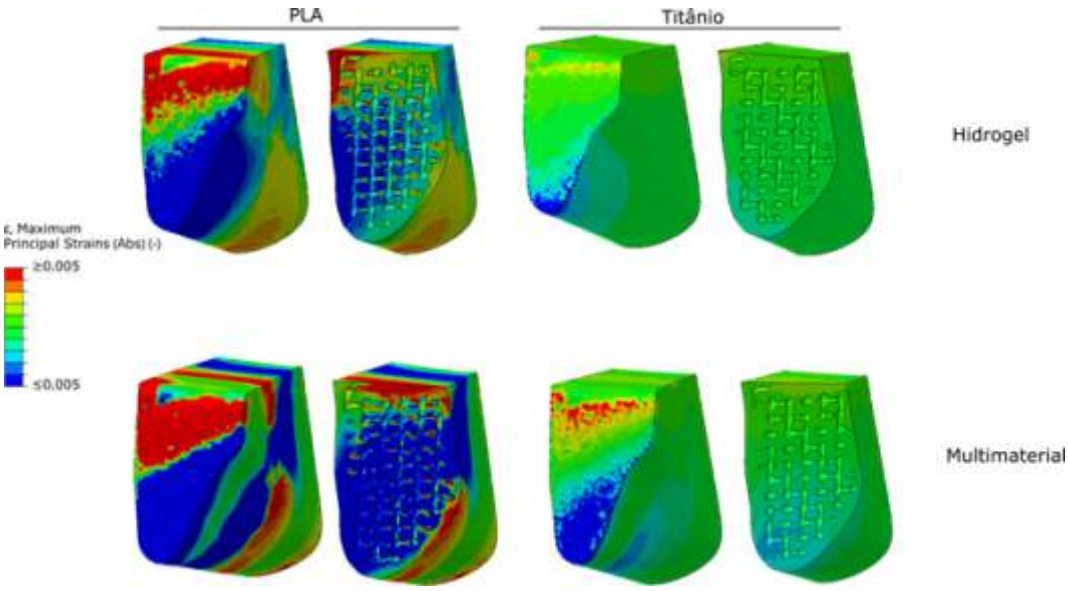


FIGURA 6
Magnitude e distribuição das deformações absolutas na região de cicatrização induzidas pela fixação de titânio e PLA com os dois tipos de estrutura de scaffold.

em PLA. Considerando o dispositivo de fixação em PLA, a deformação mecânica mediana para um *scaffold* totalmente de hidrogel na região de cicatrização é cerca de 0,3%. Com o uso do *scaffold* multimaterial, as deformações mecânicas na região de hidrogel aumentaram para cerca de 0,7%. Um estudo anterior determinou valores médios de 0,07% a 0,61% dentro da abertura interóssea (Ruf et al., 2022), no entanto, esse estudo utilizou uma força de mordida de 45 N, enquanto o presente estudo utilizou uma força de mordida de 115 N. Outro estudo sugeriu que deformações mecânicas na faixa de 0,23% a 0,6% são benéficas para a ossificação endocondral e intramembranosa (Pobloth et al., 2018a).

Além disso, nas diferenças observadas das deformações mecânicas absolutas ao longo da região de cicatrização, a magnitude das deformações é mais notável nas zonas posterior e central, enquanto na zona anterior, as deformações são menores. Isto é consistente com as observações feitas por Orassi et al. (2021b) e previsões de modelos computacionais (Tams et al., 1999; Kimsal et al., 2011; Lovald et al., 2009), que sugerem que a cicatrização óssea mandibular pode ocorrer em deformações mecânicas maiores na zona posterior, onde as forças dos músculos mandibulares são aplicadas, e na zona anterior, a cicatrização óssea acontece em deformações mais baixas.

As tensões de von Mises máximas dentro do dispositivo de fixação sugerem que ambos os materiais de fixação conseguem suportar as cargas sem incorrer uma falha estrutural. O dispositivo de fixação em PLA apresenta uma relacão menos favorável entre as tensões de von Mises máximas e a tensão de cedência em comparação com o dispositivo de fixação em liga de titânio. No entanto, as tensões obtidas colocam o comportamento do PLA na região elástica num cenário de força de mordida pós-operatória. As deformações previstas na região de cicatrização mostram que o dispositivo de fixação em titânio forneceu uma maior rigidez de fixação, conforme esperado. Isso leva a deformações consideravelmente menores na região de cicatrização, o que pode prejudicar a regeneração óssea. O problema poderia ser resolvido diminuindo a espessura da placa, de modo que a redução na rigidez induzisse um aumento nas deformações mecânicas dentro da região de cicatrização.

Este estudo apresenta várias limitações. Uma delas é o uso de propriedades de material isotrópico para o osso cortical. Em estudos futuros, o osso cortical deve ser segmentado de acordo com (Schwartz-Dabney and Dechow, 2003) e (Lovald et al., 2009) e receber propriedades de material ortotrópico para representar melhor a mandíbula. Outra limitação deste estudo é o cenário unilateral ser o único cenário de mordida avaliada. No entanto, este cenário de mordida unilateral foi escolhida como o principal cenário de mordida, pois demonstrou ser o cenário crítico para a estabilidade da fixação (Ruf et al., 2022; Orassi et al., 2021a; Korioth et al., 1992; Lovald et al., 2009).

Em resumo, este estudo teve como objetivo

investigar o desempenho biomecânico de um *scaffold* multimaterial para o tratamento de defeitos ósseos mandibulares. Do ponto de vista biomecânico, um *scaffold* multimaterial parece ser uma estratégia promissora para aumentar as deformações mecânicas dentro dos poros internos do *scaffold*, que tem sido o reportado para promover a regeneração óssea. O material cerâmico no *scaffold* multimaterial parece causar um aumento substancial nas deformações mecânicas na região onde está localizada a secção do *scaffold* de hidrogel. No entanto, por ser um material mais rígido, ele causa baixas deformações mecânicas na região onde está localizada a secção do *scaffold* cerâmico. Para melhorar essas deformações, a porosidade do *scaffold* cerâmico pode ser aumentada, reduzindo assim a rigidez e permitindo o aumento das deformações mecânicas. O modelo computacional desenvolvido neste estudo pode servir para apoiar o desenvolvimento de estratégias de tratamento.

CONFLICTO DE INTERESSE

Os autores declaram que a pesquisa foi conduzida na ausência de quaisquer relações comerciais ou financeiras que possam ser interpretadas como um potencial conflito de interesse.

CONTRIBUIÇÕES DE AUTORES

Todos os autores contribuíram para o desenvolvimento do artigo. A pesquisa e a preparação do artigo foram principalmente desenvolvidas por PR. O suporte e a supervisão na pesquisa foram fornecidos por BA, JFC, RN e MP. NR e MP reveram criticamente o artigo. Todos os autores aprovaram a versão final do artigo.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio da União Europeia (UE) através do programa Horizon 2020 para o projeto InterLynk (acordo de subvenção: H2020-NMBP-TR-IND-2020, ID do projeto: 953169) e o financiamento fornecido pelo LAETA, no âmbito do projeto UIDB/50022/2020. Além disso, os autores reconhecem o apoio da Universidade de Aveiro (UAVR) no desenvolvimento e teste dos materiais de hidrogel e cera^mica utilizados neste estudo.

REFERÊNCIAS

Checa, S., Prendergast, P. J., and Duda, G. N. (2011). Inter-species investigation of the mechano-regulation of bone healing: comparison of secondary bone healing in sheep and rat. *J Biomech* 44, 1237-45. doi:10.1016/j.jbiomech.2011.02.074

Claes, L. E. and Heigele, C. A. (1999). Magnitudes of local stress and strain along bony surfaces predict the course and type of fracture healing. *Journal of Biomechanics* 32, 255-266. doi:https://doi.org/ 10.1016/S0021-9290(98)00153-5

Daniels, J. S., Albakry, I., Braimah, R. O., and Samara, M. I. (2021). Is the routine removal of titanium plates and screws following miniplate osteosynthesis of maxillofacial bone fractures justified? a fifteen- year experience in a maxillofacial centre, saudi arabia. *Craniomaxillofacial Trauma & Reconstruction Open* 6, 24727512211065268. doi:10.1177/24727512211065268

Duda, G. N., Geissler, S., Checa, S., Tsitsilonis, S., Petersen, A., and Schmidt-Bleek, K. (2023). The decisive early phase of bone regeneration. *Nat Rev Rheumatol* 19, 78-95. doi:10.1038/ s41584-022-00887-0

Evans, G. R. D., Clark, N., Manson, P. N., and Leipziger, L. S. (1995). Role of mini- and microplate fixation in fractures of the midface and mandible. *Annals of Plastic Surgery* 34

Isler, S., Keskin, B., Cakarer, S., Cansiz, E., Gumusdal, A., and Keskin, C. (2018). The use of reconstruction plates to treat benign mandibular pathological lesions: A retrospective clinical study. *Journal of Stomatology, Oral and Maxillofacial Surgery* 119. doi:10.1016/j.jormas.2018.04.013

Kansy, K., Mueller, A. A., Mu¨cke, T., Kopp, J.-B., Koersgen, F., Wolff, K. D., et al. (2014). Microsurgical reconstruction of the head and neck - current concepts of maxillofacial surgery in europe. *Journal of Cranio-Maxillofacial Surgery* 42, 1610-1613. doi:https://doi.org/10.1016/j.jcms.2014.04.030

Khodakaram-Tafti, A., Mehrabani, D., Shaterzadeh-Yazdi, H., Zamiri, B., and Omidi, M. (2018). Tissue engineering in maxillary bone defects. *World J Plast Surg* 7, 3-11

Kimsal, J., Baack, B., Candelaria, L., Khraishi, T., and Lovald, S. (2011). Biomechanical analysis of mandibular angle fractures. *Journal of Oral and Maxillofacial Surgery* 69, 3010-3014. doi:https://doi.org/10.1016/j.joms.2010.12.042

Korioth, T. W., Romilly, D. P., and Hannam, A. G. (1992). Three-dimensional finite element stress analysis of the dentate human mandible. *Am J Phys Anthropol* 88, 69-96. doi:10.1002/ajpa.1330880107

Lakatos, , Magyar, L., and Bojtár, I. (2014). Material properties of the mandibular trabecular bone. *J Med Eng* 2014, 470539. doi:10.1155/2014/470539

Liang, H., Yang, Y., Xie, D., Li, L., Mao, N., Wang, C., et al. (2019). Trabecular-like ti-6al-4v scaffolds for orthopedic: fabrication by selective laser melting and in vitro biocompatibility. *Journal of Materials Science Technology* 35, 1284-1297. doi:https://doi.org/10.1016/j.jmst.2019.01.012

Liu, T., Xu, J., Pan, X., Ding, Z., Xie, H., Wang, X., et al. (2021). Advances of adipose-derived mesenchymal stem cells-based biomaterial scaffolds for oral and maxillofacial tissue engineering. *Bioactive Materials* 6, 2467-2478. doi:https://doi.org/10.1016/j.bioactmat.2021.01.015

Lovald, S. T., Wagner, J. D., and Baack, B. (2009). Biomechanical optimization of bone plates used in rigid fixation of mandibular fractures. *J Oral Maxillofac Surg* 67, 973-85. doi:10.1016/j.joms.2008.12.032

Mehta, M., Checa, S., Lienau, J., Hutmacher, D., and Duda, G. (2012). In vivo tracking of segmental bone defect healing reveals that callus patterning is related to early mechanical stimuli. European cells materials 24, 358-71. doi:10.22203/eCM.v024a26

Nelson, G. J. (1986). Three dimensional computer modeling of human mandibular biomechanics. Text Orassi, V., Duda, G. N., Heiland, M., Fischer, H., Rendenbach, C., and Checa, S. (2021a). Biomechanical assessment of the validity of sheep as a preclinical model for testing mandibular fracture fixation devices. *Front Bioeng Biotechnol* 9, 672176. doi:10.3389/fbioe.2021.672176

Orassi, V., Fischer, H., Duda, G. N., Heiland, M., Checa, S., and Rendenbach, C. (2021b). In silico biomechanical evaluation of we43 magnesium plates for mandibular fracture fixation. *Front Bioeng Biotechnol* 9, 803103. doi:10.3389/fbioe.2021.803103

Pobloth, A.-M., Checa, S., Razi, H., Petersen, A., Weaver, J., Schmidt-Bleek, K., et al. (2018a). Mechanobiologically optimized 3d titanium-mesh scaffolds enhance bone regeneration in critical segmental defects in sheep. *Science Translational Medicine* 10, eaam8828. doi:10.1126/scitranslmed. aam8828

Pobloth, A. M., Checa, S., Razi, H., Petersen, A., Weaver, J. C., Schmidt-Bleek, K., et al. (2018b). Mechanobiologically optimized 3d titanium-mesh scaffolds enhance bone regeneration in critical segmental defects in sheep. *Sci Transl Med* 10. doi:10.1126/scitranslmed.aam8828

Rana, M., Warraich, R., Kokemu¨ller, H., Lemound, J., Essig, H., Tavassol, F., et al. (2011). Reconstruction of mandibular defects - clinical retrospective research over a 10-year period. *Head Neck Oncology* 3, 23. doi:10.1186/1758-3284-3-23

Rendenbach, C., Ho¨lterhoff, N., Hischke, S., Kreutzer, K., Smeets, R., Assaf, A. T., et al. (2018). Free flap surgery in europe: an interdisciplinary survey. *International Journal of Oral and Maxillofacial Surgery* 47, 676-682. doi:https://doi.org/10.1016/j.ijom.2017.11.013

Rendenbach, C., Kohlmeier, C., Suling, A., Assaf, A. T., Catala-Lehnen, P., Amling, M., et al. (2016). Prospective biomechanical analysis of donor-site morbidity after fibula free flap. *Journal of Cranio- Maxillofacial Surgery* 44, 155-159. doi:https://doi.org/10.1016/j.jcms.2015.10.027

Rendenbach, C., Steffen, C., Hanken, H., Schluermann, K., Henningsen, A., Beck-Broichsitter, B., et al. (2019). Complication rates and clinical outcomes of osseous free flaps: a retrospective comparison of cad/cam versus conventional fixation in 128 patients. *Int J Oral Maxillofac Surg* 48, 1156-1162. doi:10.1016/j.ijom.2019.01.029

Rosa, N., Pouca, M. V., Torres, P., Olhero, S. M., Jorge, R. N., and Parente, M. (2023). Influence of structural features in the performance of bioceramic-based composite scaffolds for bone engineering applications: A prediction study. *Journal of Manufacturing Processes* 90, 391-405. doi:https://doi.org/ 10.1016/j.jmapro.2023.02.012

Ruf, P., Orassi, V., Fischer, H., Steffen, C., Duda, G. N., Heiland, M., et al. (2022). Towards mechanobiologically optimized mandible reconstruction: Cad/cam miniplates vs. reconstruction plates for fibula free flap fixation: A finite element study. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology* 10. doi:10.3389/fbioe.2022.1005022

Ruf, P., Orassi, V., Fischer, H., Steffen, C., Kreutzer, K., Duda, G. N., et al. (2024). Biomechanical evaluation of cad/cam magnesium miniplates as a fixation strategy for the treatment of segmental mandibular reconstruction with a fibula free flap. *Computers in Biology and Medicine* 168, 107817. doi:https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2023.107817

Schwartz-Dabney, C. L. and Dechow, P. C. (2003). Variations in cortical material properties throughout the human dentate mandible. *Am J Phys Anthropol* 120, 252-77. doi:10.1002/ajpa.10121

Shaw, R. J., Kanatas, A. N., Lowe, D., Brown, J. S., Rogers, S. N., and Vaughan, E. D. (2004). Comparison of miniplates and reconstruction plates in mandibular reconstruction. *Head & Neck* 26, 456-463. doi:https://doi.org/10.1002/hed.10343

Soufivand, A. A., Abolfathi, N., Hashemi, S. A., and Lee, S. J. (2020). Prediction of mechanical behavior of 3d bioprinted tissue-engineered scaffolds using finite element method (fem) analysis. *Additive Manufacturing* 33, 101181. doi:https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101181

Steffen, C., Duda, K., Wulsten, D., Voss, J. O., Koerdt, S., Nahles, S., et al. (2023). Clinical and technical validation of novel bite force measuring device for functional analysis after mandibular reconstruction. *Diagnostics (Basel)* 13. doi:10.3390/diagnostics13040586

Taha, S. K., Hassan, E. A., Mousa, S., El-Bassyouni, G. T., Shalash, H. N., and Abdel Hamid, M. A. (2023). Biphasic calcium phosphate doped with zirconia nanoparticles for reconstruction of induced mandibular defects in dogs: cone-beam computed tomographic and histopathologic evaluation. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine* 34. doi:10.1007/s10856-023-06731-5. Cited by: 5; All Open Access, Gold Open Access

Tams, J., Otten, B., van Loon, J.-P., and Bos, R. R. (1999). A computer study of fracture mobility and strain on biodegradable plates used for fixation of mandibular fractures. *Journal of Oral and Maxillofacial Surgery* 57, 973-981. doi:https://doi.org/10.1016/S0278-2391(99)90020-4

Tatullo, M., Genovese, F., Aiello, E., Amantea, M., Makeeva, I., Zavan, B., et al. (2019). Phosphorene is the new graphene in biomedical applications. *Materials* 12, 2301. doi:10.3390/ma12142301

Torres, P., Abrantes, J., Kaushal, A., Pina, S., Do¨ belin, N., Bohner, M., et al. (2016). Influence of mg-doping, calcium pyrophosphate impurities and cooling rate on the allotropic -tricalcium phosphate phase transformations. *Journal of the European Ceramic Society* 36, 817-827. doi:https://doi.org/10. 1016/j.jeurceramsoc.2015.09.037

Vdoviaková, K., Jenca, A., Danko, J., Kresáková, L., Simaiová, V., Reichel, P., et al. (2023). Regenerative potential of hydroxyapatite-based ceramic biomaterial on mandibular cortical bone: An in vivo study. *Biomedicines* 11. doi:10.3390/biomedicines11030877. Cited by: 6; All Open Access, Gold Open Access

Zhang, L., Yang, G., Johnson, B. N., and Jia, X. (2019). Three-dimensional (3d) printed scaffold and material selection for bone repair. *Acta Biomaterialia* 84, 16-33. doi:https://doi.org/10.1016/j.actbio. 2018.11.039

Building the Future, Layer by Layer.

Based in Guimarães, DONE Lab is an advanced Manufacturing laboratory that creates products and solutions of systems and tools through Research and Innovation, Design and Engineering and Digital Manufacturing.

COMPETENCIES & SERVICES

- new concepts of products, tools and processes
- new materials, selection and characterization
- promotion of scientific & technological knowledge
- small and mid-size productions
- development prototypes
- moulds productions
- product design and development
- generative design and topology optimization
- process, thermal and mechanical simulation

DONE Lab work approach is focused on problem solving by creating customized and innovative solutions, from development to production, through several state-of-the-art manufacturing technologies capable of ensuring the development and production of short series of products, production of experimental and functional prototypes, as well as customized assembly tools.

DONE Lab

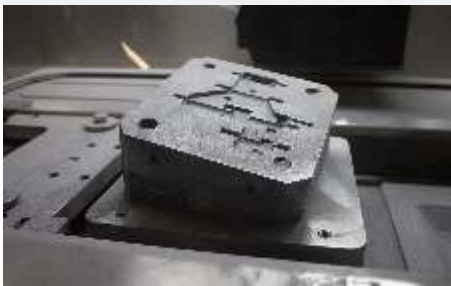
YOU START WITH A NEED
WE FINISH WITH A MASTERPIECE

Get in touch **donelab.pt** **geral@donelab.uminho.pt**







3D PRINTING FOR HEALTH: INOVAÇÃO EM SAÚDE

Claúdia Quaresma[1,2]; Bruno Soares[1,3]; Ana Oliveira[4].

1 Professor(a) Auxiliar na Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa
2 Presidente do 3D Printing Center for Health
3 Vice-presidente do 3D Printing Center for Health
4 Engenheira Biomédica no 3D Printing Center for Health
4 Aluna de doutoramento na Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

Nos últimos anos, a Impressão 3D tem revolucionado vários setores, em especial o setor da saúde, ao criar objetos a partir de modelos digitais tridimensionais de forma rápida e económica. Esta tecnologia permite a prototipagem de dispositivos médicos, desenvolvimento de próteses, dispositivos personalizados e modelos anatómicos, melhorando assim a qualidade de vida dos pacientes e otimizando processos no contexto clínico. O 3D Printing Center for Health (3DP4Health), uma associação sem fins lucrativos localizada na NOVA School of Science and Technology, foi criado para promover atividades de investigação e desenvolvimento tecnológico em impressão 3D com impacto social na área da saúde, tendo como pilares a investigação, inovação e responsabilidade social. A equipa multidisciplinar do 3DP4Health desenvolve soluções médicas inovadoras utilizando uma metodologia de co-criação centrada no utilizador. A associação conta com 50 voluntários, principalmente estudantes de Engenharia Biomédica, e atua no desenvolvimento de dispositivos personalizados, integração de inovação e investigação, e ação social. Os projetos mais relevantes são: o e-NABLE 3D Printing Center for Health, que desenvolve próteses de membros superiores impressas em 3D; o Motion Seeker, que cria dispositivos de apoio para melhorar a mobilidade e funcionalidade dos utilizadores; o 3D Anatomical Printing, que desenvolve modelos anatómicos para planeamento cirúrgico e formação de profissionais de saúde. O 3DP4Health utiliza tecnologias de Fabrico Aditivo como a extrusão de material e fotopolimerização em cuba, e materiais como o PLA, PETG e TPE. A associação promove ainda formação gratuita e aproximação científica à comunidade, participando em projetos humanitários e oferecendo serviços personalizados, exemplificando como a impressão 3D pode inovar e melhorar a saúde.

PALAVRAS-CHAVE: SAÚDE; IMPRESSÃO 3D; PERSONALIZAÇÃO: CO-CRIAÇÃO

1. INTRODUÇÃO

A impressão 3D permite o fabrico de objetos a partir de modelos digitais tridimensionais com vantagens sobre os métodos de fabrico tradicionais. Por permitir uma maior liberdade de forma, sendo muitas vezes mais célere e barata, quando comparada com estas tecnologias; a impressão 3D tem vindo a progredir rapidamente, com um impacto significativo a nível industrial e comercial[1,2].

Esta tecnologia é hoje uma realidade crescente e disruptiva em diversos setores, uma vez que tem alterado de forma significativa a conceptualização, o design e o fabrico de componentes individualizados ou objetos estruturais complexos. A evolução do hardware e dos materiais tornaram a impressão 3D cada vez mais acessível, o que tem contribuído para o aumento significativo de investigação na área. Nos últimos anos, têm sido feitos vários estudos sobre as possíveis aplicações desta tecnologia, bem como sobre o aperfeiçoamento dos materiais utilizados e dos seus produtos[3,4].

Assim, desde a sua criação, há cerca de 50 anos, a Impressão 3D tem vindo a revolucionar diversos setores, dos quais se destaca o setor da saúde, uma vez que permite a rápida prototipagem de dispositivos médicos, acelerando assim a inovação nesta área[1,2], incluindo o desenvolvimento de próteses, dispositivos médicos personalizados e modelos anatómicos, entre outros[4].

A sua aplicação na saúde, especialmente em reabilitação, tem vindo a ganhar destaque, uma vez que apresenta um grande potencial para melhorar significativamente a qualidade de vida dos pacientes, através do desenvolvimento de dispositivos adaptados às necessidades clínicas e funcionais de cada um dos utilizadores [5,6,7]. Além disso, a rápida produção e a flexibilidade da impressão 3D facilitam a melhoria contínua destes dispositivos à medida que as necessidades dos clientes evoluem[8].

Em suma, a impressão 3D desempenha um papel crucial na saúde, permitindo a criação de dispositivos customizados com repercussões significativas no desempenho ocupacional dos utilizadores, otimizando os processos de reabilitação. Esta é, sem dúvida, uma tecnologia promissora que continua a evoluir, oferecendo soluções cada vez mais avançadas para o setor da saúde e da reabilitação. Neste contexto, após vários anos de trabalho, iniciados em 2019, a aplicar impressão 3D à saúde, surge o *3D Printing Center for Health.*

2. 3D PRINTING CENTER FOR HEALTH

A Associação *3D Printing Center for Health* (3DP4Health), localizada na NOVA School of Science and Technology (NOVA FCT) é uma associação sem fins lucrativos criada em Maio de 2023, por investigadores, docentes e não docentes das seguintes unidades de investigação: Laboratório de Instrumentação, Engenharia Biomédica e Física das Radiações (LIBPhys), Unidade de Investigação e Desenvolvimento em Engenharia Mecânica e Industrial (UNIDEMI), e FCT FabLab.

Adicionalmente, o grupo conta ainda com investigadores que, desde 2015, iniciaram os seus projetos científicos no desenvolvimento de dispositivos médicos.

A associação tem como principal objetivo promover, coordenar e aplicar atividades de investigação e desenvolvimento tecnológico relacionadas com impressão 3D e com impacto social na área da saúde e independência funcional. Adicionalmente, assenta em três grandes pilares: investigação, inovação e responsabilidade social.

Consequentemente, tem como missão ser um centro de referência nacional e internacional para a saúde e independência funcional, contribuindo para o desenvolvimento de próteses, dispositivos de apoio e criação de outros dispositivos médicos através de técnicas de impressão 3D.

Através desta missão, o 3DP4Health aspira moldar um futuro onde a inovação, a investigação de ponta e a responsabilidade social se conjugam para proporcionar resultados tangíveis e duradouros para comunidades locais e globais.
A associação acredita que a inovação deve ser inclusiva, abraçando a diversidade de necessidades em todo o espectro de cuidados de saúde.

A equipa do 3DP4Health, com cariz multidisciplinar, constituída por engenheiros, médicos, terapeutas e cientistas, desenvolve soluções médicas inovadoras, usando uma metodologia de co-criação em que o processo de desenvolvimento é centrado no utilizador, envolvendo todos os intervenientes: doentes, prestadores de cuidados informais, profissionais de saúde, investigadores e estudantes. Este processo é feito em colaboração com as instituições de saúde parceiras e de forma altamente personalizada, tendo em conta as necessidades de cada indivíduo.

A associação, além dos membros dos órgãos Sociais, conta com o apoio de 50 voluntários, maioritariamente estudantes de Engenharia Biomédica, provenientes de diversas Instituições de Ensino Superior, cada um com um papel muito relevante para o cumprimento dos objetivos e missão da associação.

Os fundadores, enquanto membros dos órgãos sociais, contribuem para direcionar a associação de acordo com o seu propósito de impacto social positivo, e para fomentar um ambiente colaborativo e inovador.

2.1. ÁREAS DE ATUAÇÃO

A associação tem várias áreas de atuação:

- **Desenvolvimento de Dispositivos Inovadores:** impressão 3D Personalizada: o conhecimento e experiência na impressão 3D refletem-se na criação de dispositivos personalizados, incluindo próteses e dispositivos de apoio. Esta abordagem permite soluções adaptadas a necessidades específicas, promovendo uma integração perfeita na vida diária dos beneficiários.

- **Integração de Inovação e Investigação:** associando o rigor científico e a criatividade, são criados dispositivos personalizados e inovadores. Adicionalmente, as parcerias colaborativas com instituições de investigação, desde a área tecnológica à da saúde, garantem que os projetos são fundamentados em evidências científicas sólidas.

- **Ação Social Integrada:** a atuação da associação transcende os limites tradicionais, proporcionando serviços à comunidade de forma gratuita. Projetos com impacto social direto, como o desenvolvimento de dispositivos médicos para crianças com malformações congénitas ou para adultos que sofreram um acidente vascular cerebral ou traumatismo cranioencefálico, refletem o compromisso com a responsabilidade social. Assim, o 3DP4Health está articulado com a sociedade civil e os atores sociais.

Formação Gratuita e Aproximação Científica à Comunidade:

- **Capacitação Científica:** a associação oferece programas de formação gratuitos, conectando a comunidade à ciência e tecnologia. Workshops, palestras e cursos abertos promovem a capacitação em áreas como impressão ou modelação 3D.

Serviço à Comunidade e Projetos Humanitários:

- **Projetos de Impacto:** o 3DP4Health participa ativamente em projetos humanitários, levando a tecnologia a comunidades que enfrentam desafios únicos, nomeadamente no desempenho de atividades que lhes são significativas.
- **Atendimento Personalizado:** além do desenvolvimento de dispositivos, a equipa do 3DP4Health oferece serviços personalizados, colaborando com casos específicos e garantindo soluções precisas e eficazes.

Assim, a associação tem uma atuação abrangente e um compromisso holístico com a transformação positiva na saúde. Ao integrar inovação, investigação, formação e serviço comunitário, continua o caminho para um futuro mais acessível e centrado no paciente.

2.2. METODOLOGIA DE CO-CRIAÇÃO

O centro adota uma metodologia de co-criação, em que o processo de desenvolvimento é centrado no utilizador, envolvendo todos os intervenientes: doentes, prestadores de cuidados informais, profissionais de saúde, investigadores e estudantes.

Este processo colaborativo é realizado em parceria com instituições de saúde, garantindo uma abordagem altamente personalizada que considera as necessidades específicas de cada pessoa. A co-criação permite a integração de diversas perspectivas e conhecimentos, resultando em soluções mais eficazes e adaptadas às realidades dos usuários finais.

2.3. TECNOLOGIA

O 3DP4Health, na maioria dos seus projetos, utiliza como tecnologias de Fabrico Aditivo a extrusão de material, variante do Fabrico por Filamento Fundido (FFF), e Fotopolimerização em cuba, variante da *Masked Stereolitho-graphy* (MSLA). Geralmente, esta última tecnologia é utilizada na impressão de modelos anatómicos para planeamento cirúrgico.

Relativamente aos materiais adoptados, o centro trabalha predominantemente com Ácido Poliláctico (PLA), Politereftalato de etileno com grupo Glicol (PETG), e Elastómero Termoplástico (TPE).

Para além dos equipamentos de impressão, o centro conta, também, com scanners 3D, sendo essenciais no desenvolvimento de dispositivos mais complexos. Os softwares mais usados são o Fusion360 para o design, Meshmixer e Mesh inspector para tratamento de malhas, sendo utilizado diversos softwares de *slicing* para preparação de impressão.

2.4. PROJETOS PRINCIPAIS

O 3DP4Health é um centro de referência na aplicação da tecnologia de impressão 3D na área da saúde. Entre os seus projetos mais destacados estão o *e-NABLE 3D Printing Center for Health, o Motion Seeker* e o *3D Anatomical Printing*. Cada um destes projetos visa abordar desafios específicos na saúde, utilizando a impressão 3D para desenvolver soluções inovadoras e personalizadas.



FIGURA 1
Exemplo de um dos modelos das proteses e-NABLE

e-NABLE 3D PRINTING CENTER FOR HEALTH

O projeto e-NABLE 3D printing Center for Health está registado como centro de referência da organização internacional e-NABLE e pretende desenvolver ou adaptar próteses de membros superiores impressas em 3D, proporcionando soluções acessíveis e personalizadas para indivíduos com amputação. O projeto envolve a criação de próteses funcionais, que ajudam os

usuários a recuperar a confiança e a independência em suas atividades diárias (Fig.1), utilizando sobretudo FFF.



FIGURA 2
Dispositivo de apoio para crianças com agnésia

MOTION SEEKER

O projeto Motion Seeker tem como objetivo desenvolver dispositivos e tecnologias de apoio impressos em 3D, para crianças, adultos e idosos. O processo de design, desenvolvimento e validação é feito com recurso à referida metodologia de co-criação, garantindo que os dispositivos respondem às necessidades específicas dos utilizadores. Este projeto foca-se na criação de soluções que melhorem a mobilidade e a funcionalidade nas atividades da vida diária, produtivas e de lazer (Fig.2 e 3), utilizando predominantemente FFF.

Os dispositivos desenvolvidos podem ser utilizados eficazmente no apoio ao processo de



FIGURA 3
Dispositivo para uma pessoa com uma doença degenerativa que não consegue segurar o secador



FIGURA 4
Dispositivo para promover o movimento de pronação e supinação. auxiliando no processo de reabilitação destes movimentos

3D ANATOMICAL PRINTING

O projeto *3D Anatomical Printing* tem como foco o desenvolvimento de modelos anatómicos com base em imagem médica. O objectivo destes modelos é ajudar no planeamento de cirurgia e na formação dos profissionais de saúde. Os modelos impressos em 3D permitem uma visualização precisa e prática das estruturas anatómicas, melhorando os resultados cirúrgicos e a educação médica. Além disso, esses modelos servem como ferramentas de ensino para profissionais de saúde, proporcionando uma compreensão mais profunda e incluindo uma grande componente prática relacionada com a anatomia, com recurso a MSLA.

3. CONCLUSÃO

O 3DP4Health é o exemplo de como a tecnologia de impressão 3D pode ser utilizada para inovar e melhorar significativamente a área da



FIGURA5
Exemplo de dois corações impressos de crianças com malformação congénita

saúde. Através de uma abordagem colaborativa e centrada no utilizador, o centro desenvolve soluções personalizadas que atendem às necessidades específicas de cada paciente. Com projetos focados na criação de próteses, dispositivos de apoio e modelos anatómicos, o centro está na vanguarda da inovação em saúde, contribuindo para a melhoria da qualidade de vida e do desempenho ocupacional dos pacientes. A expansão contínua de suas atividades e a procura por novas parcerias garantem que o 3DP4Health continuará a ser uma referência no Fabrico Aditivo aplicado à saúde, oferecendo soluções cada vez mais avançadas e impactantes, registando notáveis avanços, principalmente na área da investigação.

Todos os dias, a equipa do 3DP4Health dedica-se incansavelmente ao desenvolvimento de dispositivos inovadores, com excelente feedback por parte dos utilizadores finais, alcançando resultados que fortalecem a sua missão de promover saúde e independência funcional.

A colaboração estratégica com centros de excelência tem impulsionado projetos pioneiros, nos quais têm sido exploradas novas possibilidades de aplicação da impressão 3D para melhorar a qualidade de vida dos pacientes. A associação está comprometida em manter-se na vanguarda da investigação e do desenvolvimento tecnológico, contribuindo para a evolução dos cuidados de saúde personalizados. Estes últimos meses têm sido fundamentais para consolidar as bases que sustentarão os seus futuros esforços.

O 3DP4Health acredita que a criação e partilha de conhecimento nesta área é fundamental para o progresso sustentável. Assim, além de conduzir investigação inovadora, a equipa dedica-se a capacitar outros investigadores, organizando workshops, cursos práticos e iniciativas de formação que proporcionam competências tangíveis na área da impressão 3D aplicada à saúde.

Cada projeto de investigação em que se envolve é concebido com um propósito claro: contribuir para a saúde e bem-estar dos utilizadores através de soluções inovadoras. Ao focar a sua investigação em áreas como impressão 3D personalizada, dispositivos médicos avançados e próteses customizadas, o centro procura preencher lacunas críticas na prestação de cuidados de saúde.

A multidisciplinaridade é uma característica distintiva do enfoque de investigação da associação. A mesma é garantida através da colaboração com especialistas em engenharia, ciências médicas, design e outras disciplinas, integrando diversas perspetivas para criar soluções abrangentes e impactantes.

O 3DP4Health não se esgota neste projecto e pretende alargar o seu leque de ação, sem nunca esquecer o seu propósito: desenvolver dispositivos com recurso à impressão 3D e com elevado impacto social. A visão futura do centro inclui a exploração de novas tecnologias e materiais, bem como a ampliação das parcerias com instituições de saúde e pesquisa para desenvolver soluções cada vez mais avançadas e eficazes.

REFERÊNCIAS

1. O. Abdulhameed, A. Al-Ahmari, W. Ameen, S.H. Mian Additive manufacturing: challenges, trends, and applications. Adv. Mech. Eng., 11 (2) (2019), pp. 1- 27, 10.1177/1687814018822880
2. Buj-Corral, A. Tejo-Otero, F. Fenollosa-Arte?s Use of FDM technology in healthcare applications: recent advances. Fused Deposition Modeling Based 3D Printing (2021), pp. 277-297
3. Valentina Tomei, Ernesto Grande, Michele Arturo Caponero, Maura Imbimbo. 3D-printing for the rehabilitation and health monitoring of structures with FBG: Experimental tests. Construction and Building Materials. Volume 416, 16 February 2024, 135067
4. Wilfredo López-Ojeda, Robin A. Hurley. Digital Innovation in Neuroanatomy: Three-Dimensional (3D) Image Processing and Printing for Medical Curricula and Health Care Journal of Neuropsychiatry and Clinical Neurosciences Volume 35(3) https://doi.org/10.1176/appi.neuropsych.20230072



inegi driving science & innovation

Tecnologias Avançadas de Fabrico (Aditivo, Subtrativo, Híbrido)

SUPORTE

Produção de protótipos
Assistência, fabrico e reparação de componentes
Definição de processos de fabrico
Desenvolvimento de (multi)materiais e revestimentos
Caracterização mecânica avançada
Tratamento térmico
Acabamento de precisão
Pós-processamento, inspeção e teste

+351 229 578 710
inegi@inegi.up.pt
https://www.inegi.pt/pt/
Rua Dr. Roberto Frias, 400

FABRICO ADITIVO DE ALIMENTOS: INFLUÊNCIA DA VISCOELASTICIDADE NA IMPRESSÃO 3D DE ALIMENTOS

T.D. Campos[1,2(*)], A. Zille[3], N. Dourado[2,4]

1 CMEMS-UMINHO, Universidade do Minho, 4804-533, Guimarães, Portugal, teresa.ac.biome@gmail.pt
2 LABBELS - Associate Laboratory, Braga, Guimarães, Portugal
3 2C2T - Universidade do Minho, 4804-533, Guimarães, Portugal, azille@2c2t.uminho.pt
4 CMEMS-UMINHO, Universidade do Minho, 4800-058, Guimarães, Portugal, nunodourado@dem.uminho.pt

INTRODUÇÃO

A impressão 3D de alimentos representa uma das inovações mais promissoras na interseção da tecnologia e da indústria alimentar. Este conceito tem o potencial de revolucionar a forma como os alimentos são produzidos, preparados e consumidos, não só contribuindo para reduzir o desperdício de alimentos ao longo da cadeia de produção, mas também criando oportunidades para o desenvolvimento de novas formas e paradigmas de consumo de alimentos.

A primeira aplicação da impressão 3D de alimentos foi reportada em 2006, na Universidade de Cornell, onde se desenvolveu uma impressora específica para o processamento de alimentos [1]. Desde então, a tecnologia evoluiu significativamente, permitindo a criação de alimentos com formas, texturas, sabores e cores personalizados. Nos últimos 10 anos, a realização de numerosas aplicações experimentais tem revelado a complexidade da impressão de múltiplos materiais que identificamos como alimentos [2-4]. O chocolate foi um dos primeiros alimentos utilizados para imprimir estruturas comestíveis devido à sua similaridade com os materiais de impressão tradicionalmente empregues. Outros materiais, como massas de cereais e purés de vegetais, têm, também, sido empregues, apesar dos desafios impostos pelas suas propriedades reológicas variáveis que apresentam [5]. Os alimentos constituem um sistema complexo de ingredientes que podem apresentar propriedades reológicas muito diferenciadas [6]. Para imprimir adequadamente, é necessário avaliar a influência das propriedades do material, definir as tecnologias a empregar, e estabelecer o preenchimento interno dos objetos.

Inúmeras vantagens são apontadas a esta tecnologia, nomeadamente o potencial para o enriquecimento em nutrientes de qualquer material alimentar ou a melhoria da aparência e da textura de produtos alimentares tradicionais através do controlo de materiais alimentares, tanto a nível macro como microestrutural [7,8]. Contudo, existem algumas limitações correspondentes às características e consequente capacidade de impressão das amostras (Figura 1). Apesar dos avanços registados na investigação científica, existe ainda um acentuado défice de conhecimento necessário para atrair um maior volume de investimento para a indústria alimentar. Os trabalhos existentes nesta área têm-se limitado à criação de preparações alimentícias macias, com geometrias simples, sem considerar a relação entre a microestrutura dos alimentos e as propriedades mecânicas à escala macroscópica [9-12]. A literatura [13-15] enfatiza a necessidade de realizar estudos mais aprofundados sobre a relação entre as características mecânicas e reológicas de produtos alimentares e sua geometria e textura, independentemente da formulação, que ainda permanece inexplorada. Nesse sentido, torna-se imprescindível desenvolver modelos computacionais que ofereçam a possibilidade de empregar leis constitutivas adequadas à reprodução do comportamento mecânico de formulações alimentares resultantes da impressão 3D, com base em informação experimental apropriada. Tal caracterização é vital para o avanço do conhecimento científico nesta área, de uma forma sustentada, com o objetivo de criar novos produtos alimentícios com propriedades aprimoradas. Neste contexto, insere-se o comportamento viscoelástico dos alimentos, atendendo às características evidenciadas pela literatura existente.

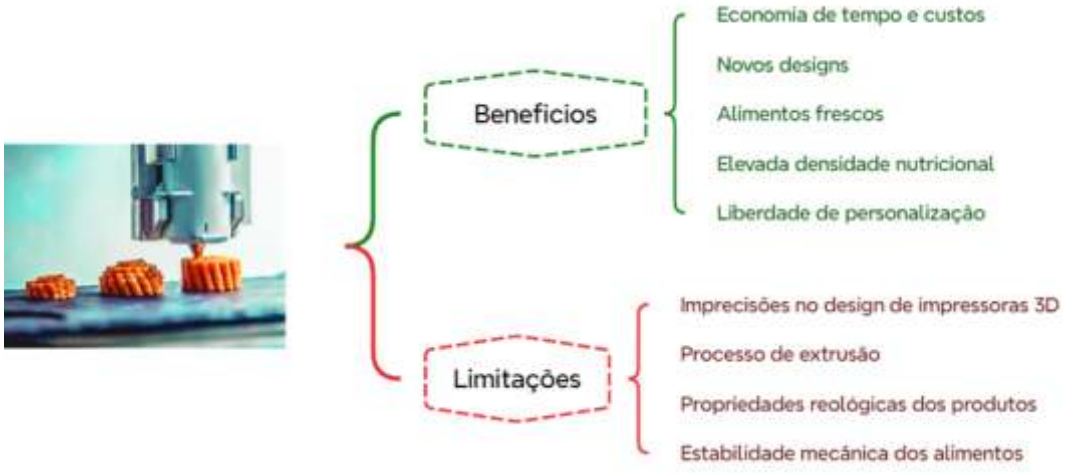


FIGURA 1
Principais benefícios e limitações da impressão 3D de alimentos. "Comida preparada na hora", adaptado de Natural Machines©.

2. COMPORTAMENTO VISCOELÁSTICO

A viscoelasticidade é a resposta mecânica dependente do tempo (*t*) de um determinado material quando submetido a uma tensão constante ou deformação imposta. Esta resposta, que incorpora a elasticidade do material, depende da resistência ao escoamento do material, que sofre alterações ao longo do tempo. Sabe-se que diferentes composições alimentares exibem propriedades viscoelásticas distintas, o que pode impactar no seu comportamento mecânico durante as fases de processamento e armazenamento [16,17]. As propriedades viscoelásticas dos materiais alimentares são influenciadas por fatores como a composição, a estrutura e as condições de processamento dos ingredientes utilizados. Por exemplo, as proteínas, os carboidratos e os lípidos presentes nos alimentos podem interagir entre si para formar estruturas com diferentes rigidezes, traduzindo-se em alterações da viscoelasticidade do material.

Dado que as tecnologias de produção de alimentos por impressão 3D utilizam a deposição de camadas sucessivas, a resposta destas dependente do tempo no produto final também depende da adesividade entre camadas, ou seja, do comportamento mecânico das juntas que resultam da sobreposição de camadas, ao longo do tempo. Compreender o comportamento viscoelástico dos alimentos impressos passa, igualmente, por perceber a influência que estas juntas têm na resposta global. Esta abordagem oferece a possibilidade de desenvolver produtos alimentares com propriedades sensoriais desejáveis, customizáveis, por via da manipulação de parâmetros de processamento dos alimentos no equipamento de impressão a utilizar. Controlando as propriedades viscoelásticas dos materiais alimentares, os fabricantes de alimentos podem assim conceber produtos alimentares com uma ampla gama de texturas e consistências, além de melhorar a eficiência e eficácia das técnicas de processamento [15-17].

A frescura percebida de alguns alimentos é influenciada pela temperatura de transição vítrea (*Tg*) dos ingredientes nos alimentos. A título de exemplo, um biscoito fresco, exibe um valor de *Tg* de aproximadamente 60°C. Isso significa que, uma vez consumido perto da temperatura ambiente, na condição vítrea, seria percecionado como um alimento crocante. Devido ao impacto plastificante que a humidade absorvida tem neste produto alimentar, o peso do mesmo regista um acréscimo de 5%, enquanto o *Tg* sofre uma queda de 10°C após a exposição ao ambiente. Nestas condições, a textura que o alimento passaria a exibir transmitira a impressão de um alimento maleável ou com a configuração de um elastómero. Podem citar-se outros exemplos envolvendo a utilização de produtos alimentares, que foram alvo de estudo dedicado no âmbito do comportamento viscoelástico, com particular incidência na fluência (mediante uma lei de potência). Registam-se, igualmente, estudos que envolvem a análise do comportamento viscoelástico não linear, representado por uma sucessão de integrais (Green-Rivlin) [18].

2.1. FUNÇÃO VISCOELÁSTICA

O estudo do comportamento viscoelástico é de grande interesse nas formulações alimentares produzidas por impressão 3D, visto que, contrariamente ao que sucede com os materiais elásticos e plásticos, nestas formulações a relação entre a tensão σ e a deformação ε é dependente do tempo e da velocidade com que a solicitação é aplicada. Este comportamento é influenciado pela composição e pela microestrutura daquelas formulações, tendo impacto na

resistência mecânica e na estabilidade dimensional ao longo do tempo [17,18]. O interesse pela fluência das formulações alimentares, resulta do facto de estas estarem permanentemente sujeitas à ação de uma tensão uniforme , devido ao peso próprio. Em condições laboratoriais este fenómeno é analisado em sequência da aplicação súbita de uma solicitação uniforme que permanece constante durante um certo intervalo de tempo (Figure 1 a). A uma dimensão, esta dependência é traduzida pela expressão,

$$\sigma(t)=\sigma_0\mathcal{H}(t) \qquad (1)$$

sendo $\mathcal{H}(t)$ a função Heaviside, ou função degrau unitário (Figura 1a), que assume o valor 0 para $t < 0$, 1/2 para $t = 0$, e 1 para $t > 0$. O efeito deste carregamento nos materiais viscoelásticos é observado na função que exprime o andamento da deformação com o tempo, que é designado por curva de fluência (Figura 1b). Para muitos materiais viscoelásticos, e em certas condições de carregamento, constata-se que o rácio entre a deformação e a tensão é só função do tempo, e não dos valores da deformação e da tensão. Por conseguinte, para $t = 0$ tem-se [18],

$$J(t)=\frac{\varepsilon(t)}{\sigma_0},\quad \forall\sigma_0 \qquad (2)$$

Os materiais que satisfazem esta relação são designados por materiais viscoelásticos lineares, sendo $J(t)$ independente da intensidade da tensão uniforme instalada no material. A interceção da curva de fluência com o eixo das ordenadas (Figura 1b) define a elasticidade instantânea. A este respeito, deve notar-se que não é possível, fisicamente, aplicar uma carga de forma instantânea. Esta circunstância, de um ponto de vista meramente matemático, e tendo presente a função degrau unitário $\mathcal{H}(t)$ atrás referida, na vizinhança do ponto $t = 0$ corresponde a um domínio infinitamente grande, numa escala logarítmica. A prática experimental, no entanto, determina que se aplique uma solicitação com a maior velocidade possível. Decorrido algum tempo t_d (tipicamente 900 segundos em materiais biológicos), se a tensão for instantaneamente removida, constata-se, também no caso dos materiais serem viscoelásticos, que a deformação diminui de forma progressiva com o tempo, até que eventualmente seja atingido o valor nulo. Este efeito é designado por recuperação [16-18].

O funcional $J(t)$ na Eq.(2) pode ser estabelecido na forma $J(t) = j(t)\,\mathcal{H}(t)$, sendo uma função definida no espaço tempo. Esta forma funcional resulta de um conceito físico de causalidade, isto

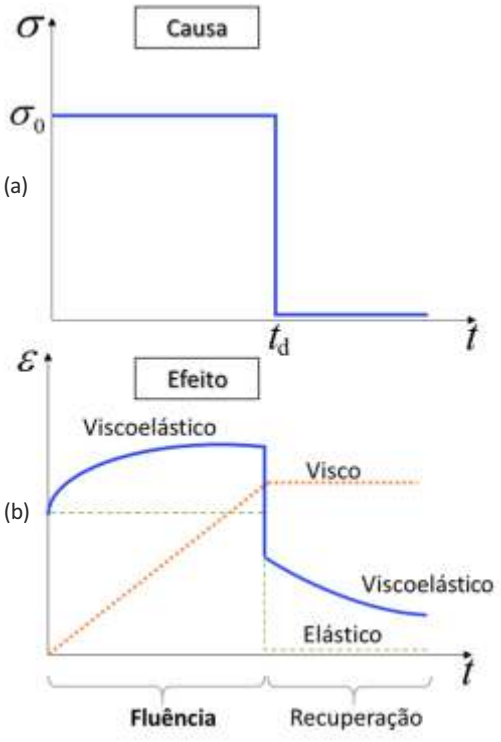


FIGURA 1
Resposta típica de fluência [16]

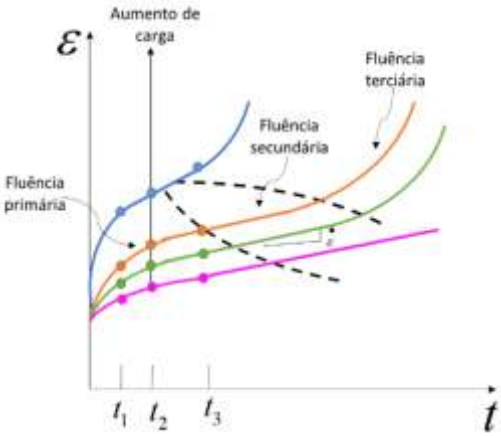


FIGURA 2
Regiões de resposta de fluência. Deformação em função do tempo, para diferentes intensidades de carga [16]

é, o efeito não precede a causa verificada.

Normalmente, as curvas de fluência apresentam três regiões distintas (Figura 2), a saber: a região de fluência primária, segundo a qual, a concavidade está voltada para baixo; a região de fluência secundária, segundo a qual a deformação é proporcional ao tempo; e a região de fluência terciária, caracterizada pela progressão acelerada do fenómeno de fluência até à rotura. Tanto a região de fluência secundária, como a de fluência terciária, correspondem a uma manifestação de viscoelasticidade não linear. Deve ter-se pre-sente de que apesar de na região de fluência secundária, se traduzir a relação entre a causa e o efeito (tensão e deformação, respetivamente),

através de uma linha reta (taxa de carregamento constante), na verdade esta não tem qualquer correspondência com o fenómeno de viscoelasticidade linear a que atrás se fez menção. Neste caso, a resposta linear no caso de fluência envolve uma relação linear entre causa e efeito: tensão e deformação, num dado intervalo de tempo [18].

Os materiais biológicos são considerados compostos naturais heterogéneos. A maioria dos tecidos exibe um efeito de pré-condicionamento, no qual a resposta a uma carga inicial difere da resposta a uma carga subsequente. Em alguns casos, o comportamento não se estabiliza até que vários ciclos de carga sejam aplicados. As propriedades dos tecidos mudam ao longo do tempo como resultado do envelhecimento biológico e, portanto, exibem comportamento não linear [16-18].

2.2. IMPRIMIBILIDADE

A viscosidade desempenha um papel crítico na imprimibilidade (aptidão de impressão) das formulações alimentares empregues no fabrico aditivo. A Tabela 1 resume detalhada sobre o efeito da viscoelasticidade nas diferentes características do processo de impressão [19,20].

As propriedades viscoelásticas das formulações alimentares podem também afetar a velocidade de impressão, a aderência entre camadas e a confiabilidade (previsibilidade) da forma. Formulações de reduzida viscosidade têm tendência a deformar-se demasiadamente, resultando numa má aderência entre camadas, enquanto as formulações com elevada viscosidade (muito rígidas) podem não se fundir adequadamente às camadas anteriormente depositadas [23,24]. A elasticidade das formula-

TABELA 1
Impacto da viscosidade na aptidão à impressão de formulações alimentares

Parâmetro	*Influência na Viscosidade*	*Impacto na Imprimibilidade*	*Referências*
Temperatura	• Formulações com temperatura de gelificação mais alta proporcionam melhor controlo dimensional durante a impressão. • À temperatura ambiente, certas formulações tendem a tornar-se excessivamente rígidas, dificultando o processo de impressão. • Certas formulações exibem viscosidades baixas a temperaturas acima do ponto de gelificação. • Transformação no estado sólido abaixo do ponto de gelificação afeta a imprimibilidade. • Propriedades viscoelásticas tornam-se independentes da temperatura acima do ponto de gelificação.	• Definição clara das estruturas e menor espalhamento do material alcançado com formulações a temperatura de gelificação mais alta. • Dificuldade na impressão devido à rigidez excessiva à temperatura ambiente para certas formulações.	[20], [21]
Teor de Humidade	• Em vários alimentos, afeta o peso, a textura e a vida útil. • Aumenta devido à água adicionada após-impressão. • Relação inversa entre teor de humidade e viscosidade, importante para ajustar a viscosidade dos alimentos sem uso de aditivos.	• Desafios na reologia e textura.	[22], [23]
Taxa e tensão de corte	• Redução da viscosidade à medida que a taxa de corte e a tensão de corte aumentam. • Aumento da deformação conduz a uma menor resistência e escoamento mais fácil da tinta alimentar através do extrusor. • A tensão de escoamento indica a força máxima antes que a deformação se torne irreversível.	• Impacto na determinação da estabilidade e robustez da tinta alimentar.	[23], [24]

ções alimentares também pode afetar a sua capacidade de se conformar às camadas adjacentes. Na produção de produtos alimentares por fabrico aditivo, recorre-se, frequentemente, à deposição de camadas com o intuito de formar redes. Estas estruturas são muitas vezes usadas para efetuar medições de fidelidade de forma [25], em particular nas regiões da interseção dos filamentos que formam estas redes. A fidelidade de forma é influenciada pela distância entre as linhas (*D*) dos filamentos depositados - que exibem a forma de haltere -, sendo mais ampla se observada para valores de *D* mais baixos. Com a diminuição da distância entre as linhas (*D*), constata-se uma maior sobreposição das áreas de contacto entre as linhas dos filamentos, tornando-se menos percetível a forma de haltere. Outra característica muito relevante na fidelidade de forma, está relacionada com uma propriedade funcional imprescindível no processo de conformação de muitos alimentos, designada por gelificação alimentar. De entre os alimentos em que esta propriedade é fundamental, destacam-se os produtos lácteos, os alimentos ricos em clara de ovo, muitos produtos cárneos, géis de proteína de soja, proteínas vegetais texturizadas por extrusão e produtos de panificação [26]. No fabrico aditivo, a gelificação tem impacto na produção de superfícies lisas, e na obtenção de configurações tridimensionais uniformes. Se o processo de gelificação for excessivo, assiste-se à formação de filamentos rígidos, com propensão à formação de zonas fraturadas. Se este não for devidamente assegurado (sub gelificação), é possível observar o afloramento de líquidos em muitas regiões das peças alimentares, com ocorrência de gotejamento [7,27].

De um modo geral, alcançar a qualidade ótima de impressão nas peças alimentares requer um equilíbrio cuidadoso entre a viscosidade e a elasticidade da formulação empregue no seu fabrico. Recentemente, tem surgido na literatura um número muito significativo de estudos que analisam a relação entre a viscoelasticidade e a aptidão à impressão (imprimibilidade) em várias formulações alimentares. A Tabela 2 resume a pesquisa que foi feita a esse respeito.

Park et al. [7] investigaram o efeito da viscosidade e do módulo de elasticidade de formulações alimentares na imprimibilidade de tintas (alimentares) à base de alginato na impressão 3D por extrusão. Esses estudos revelaram que o aumento da viscosidade e do módulo de elasticidade da tinta conduziu a uma melhoria da imprimibilidade, bem como a uma maior fidelidade de forma. Noutro estudo, da autoria de Mathobo et al. [22] foi analisado o efeito da viscoelasticidade na imprimibilidade de tintas à base de farinha de arroz na impressão 3D por jato de tinta. Os autores concluíram que o aumento do módulo de elasticidade da tinta permitiu melhorar a formação e a aderência das gotas de tinta alimentar, enquanto a diminuição da viscosidade traduziu-se no melhora-mento do acabamento superficial.

Lille et al. [27] mediram as propriedades viscoelásticas de pastas selecionadas por varrimento oscilatório, com o objetivo de descobrir se estas poderiam ser utilizadas na previsão da imprimibilidade dos materiais.
Os autores concluíram que a melhor exatidão de impressão e estabilidade da forma são obtidas com uma pasta à base de leite em pó desnatado. As medições reológicas realizadas pelos autores revelaram que a estabilidade de forma após a impressão está relacionada com a tensão de escoamento da pasta. Estes autores concluíram ainda que é necessária uma alta tensão de escoamento para alcançar uma boa estabilidade da forma após a impressão.

2.3. VISCOSIDADE NAS PROPRIEDADES SENSORIAIS

A viscosidade dos materiais alimentícios pode influenciar significativamente as propriedades sensoriais que são percecionadas durante as fases de mastigação e deglutição, uma vez impressos, incluindo a textura e a mastigação

TABELA 2
Comportamento viscoelástico de diferentes alimentos

Material de Impressão	**Tecnologia de Impressão**	***Condições***	***Influência***
À base de alginato [7]	Extrusão	• Aumento da viscosidade e do módulo de elasticidade	• Melhora a imprimibilidade e a previsibilidade da forma
Amido [22]	Jato de tinta	• Aumento do módulo elástico • Diminuição da viscosidade	• Melhora a formação e aderência das gotas • Melhor acabamento superficial
Pasta à base de leite em pó desnatado [27]	Extrusão	• Elevada tensão de escoamento	• Aumenta a estabilidade da forma e a exatidão da impressão

dos mesmos. A textura de um produto alimentício é uma propriedade complexa que envolve vários fatores, como o tamanho e a forma das partículas, o arranjo destas e as interações entre elas. A viscoelasticidade dos materiais alimentícios pode influenciar esses fatores e, por sua vez, afetar a textura dos produtos alimentícios impressos em 3D [28].

Liu et al. [29] investigaram os efeitos de diferentes formulações alimentares nas propriedades reológicas e na microestrutura do sistema de impressão. Os autores avaliaram os efeitos da gelatina e da sacarose, assim como da combinação de gelatina e de proteína da clara do ovo em parâmetros sensoriais. Os diferentes materiais afetaram significativamente a viscosidade e a perceção sensorial que resultou da ingestão de formulações produzidas pelos sistemas de impressão 3D utilizados. Qiu et al. [30] estudaram o efeito da viscoelasticidade nas propriedades sensoriais de produtos à base de puré de frutas empregues na impressão 3D. Aqueles autores concluíram que o aumento do módulo de elasticidade do puré teve como consequência o acréscimo da firmeza da textura da formulação alimentar produzida, bem da coesividade desta, enquanto o aumento a viscosidade produziu uma sensação (na boca) de maior suavidade e de menor adstringência.

A literatura [31-33] sugere que controlar cuidadosamente as propriedades reológicas dos materiais alimentares é um aspeto crucial para atingir as propriedades sensoriais desejadas em produtos alimentares produzidos por fabrico aditivo (3D). Ao ajustar a viscosidade, elasticidade e outras propriedades reológicas dos materiais alimentares, pode ser possível criar experiências sensoriais novas e únicas em alimentos impressos, como texturas e sensações (na boca) personalizadas que não podem ser alcançadas por meio de métodos tradicionais de processamento de alimentos. A Tabela 3 resume as principais conclusões retiradas de estudos dedicados à análise da viscosidade dos alimentos empregues na impressão 3D.

CONCLUSÃO

Este trabalho abordou a relação entre as propriedades reológicas de formulações alimentares empregues no fabrico aditivo, e as suas implicações nos aspetos sensoriais, despoletados nas fases de mastigação e deglutição. O surgimento de publicações recentes nesta temática, permitiu concluir que a imprimibilidade (aptidão de impressão) e os atributos sensoriais das formulações alimentares empregues no fabrico aditivo dependem significativamente das propriedades viscoelásticas dessas formulações. Por conseguinte, o controlo dos parâmetros reológicos dos materiais alimentares, como a viscosidade, o módulo de elasticidade e a tensão de escoamento, é crucial para alcançar a imprimibilidade adequada e os atributos sensoriais desejados para produtos alimentares impressos. Concluiu-se que a viscosidade tem impacto na definição na estabilidade dimensional das peças (ou produtos) alimentares ao longo do tempo. O aumento da viscosidade e do módulo de elasticidade desses materiais permite melhorar a imprimibilidade e a previsibilidade das formulações alimentares, bem como a formação e aderência entre camadas. A diminuição da viscosidade, por outro lado, trás benefícios no acabamento superficial das peças. Os estudos futuros devem assim focar-se em identificar:

- A relação entre imprimibilidade e as propriedades reológicas em formulações alimentares, analisando o efeito da reologia dos materiais no desempenho estrutural de peças alimentares impressas.
- Efeito das propriedades reológicas das formulações alimentares na textura de produtos alimentares impressos.

Para superar os desafios da impressão 3D na produção de alimentos, é essencial adotar uma abordagem interdisciplinar que reúna conhecimentos em Ciência dos Alimentos e Mecânica dos Meios Contínuos nas vertentes experimental e computacional. Os avanços que ocorreram

TABELA 3
Efeito da viscosidade de difrentes alimentos produzidos por impressão 3D

Autor	Estudo	Resultados
Qiu et al. [30]	Efeitos da viscosidade na textura e sabor	Maior viscosidade = textura mais suave e menor sensação adstringente
Liu et al. [29]	Comportamento da viscosidade com gelatina e adição de açúcar	Maior viscosidade = impressão mais difícil
Keerthana et al. [34]	Mudanças na viscosidade com aumento da taxa de corte	Maiores frações de fibra = aumento da dificuldade na imprimibilidade

nestas áreas são cruciais para explorar plenamente o potencial desta tecnologia, possibilitando a criação de produtos alimentares inovadores com características únicas e perfis nutricionais personalizados. O setor agroalimentar poderá beneficiar significativamente da impressão 3D, especialmente na criação de atributos sensoriais durante as fases de mastigação e deglutição. Características como a firmeza e a crocância são fundamentais para a percepção do sabor de muitos alimentos frescos. Além disso, a estabilidade mecânica dos produtos alimentares deve ser cuidadosa-mente considerada para garantir o transporte, armazenamento e manuseio adequados. Uma estratégia promissora envolve a integração de modelos provisórios do comportamento mecânico dos alimentos nas metodologias de impressão 3D. Contudo, a reprodução satisfatória do comportamento mecânico dos produtos impressos, baseada nos parâmetros materiais mais relevantes obtidos experimentalmente, ainda não foi alcançada com sucesso.

Superar os desafios da impressão 3D na produção de alimentos exige uma compreensão aprofundada, no sentido de controlar as propriedades viscoelásticas dos materiais alimentares. A inexistência de procedimentos estáveis e padronizáveis na fase de caracterização experimental dos materiais alimentares, tendo por objetivo avaliar o comportamento não linear e a dependência no tempo da resposta destes materiais, aliada à necessidade de implementar técnicas de processamento adequadas, são obstáculos importantes neste domínio. Uma abordagem multidisciplinar é assim necessária para desenvolver esta importante área de conhecimento. Com uma abordagem integrada e colaborativa, será possível explorar todo o potencial da impressão 3D na produção de alimentos, revolucionando o setor agroalimentar e proporcionando produtos com maior valor nutricional, com maior sustentabilidade e personalização.

REFERÊNCIAS

[1] Lipton, J. I., Cutler, M., Nigi, F., Cohen, D., & Lipson, H. (2015). Additive manufacturing for the food industry. Trends Food Sci. Technol., 43(1):114 - 123.

[2] Pati, F., Ha, D.- H., Jang, J., Han, H. H., Rhie,J.-W., Cho, D. W.(2015). Biomimetic 3D tissue printing for soft tissue regeneration. Biomaterials, 62:164 - 75.

[3] Derossi, A., Caporizzi, R., Azzollini, D., Severini, C. (2018). Application of 3D printing for customized food. A case on the development of a fruit-based snack for children. J. Food Eng., 220:65 - 75.

[4] Derossi, A., Caporizzi, R., Paolillo, M., Oral, M. O., Severini, C. (2021). Drawing the scientific landscape of 3D Food Printing. Maps and interpretation of the global information in the first 13 years of detailed experiments, from 2007 to 2020. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 70, 102689.

[5] Ricci, I., Derossi, A., & Severini, C. (2019). 3D Printed Food from fruits and Vegetables. In Godoi, F.C., Bhandari, B.R., Zhang, M. (Eds.), Fundamentals of 3D Printing and Applications, (5,117-149). Elsevier Inc., ISBN 978-0-12-814564-7.

[6] Manthial, S., Prakash, S., Condi Godoi, F., & Bhandari, B. (2018). Optimization of chocolate 3D printing by correlating thermal and flow properties with 3D structure modeling. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 44, 21-29.

[7] Park, S. M., Kim, H. W., Park, H. J. (2020). Callus-based 3D printing for food exemplified with carrot tissues and its potential for innovative food production. Journal of Food Engineering, 271: 109781.

[8] Ouyang, L., Yao, R., Zhao, Y., Sun, W. (2016). Effect of bioink properties on printability and cell viability for 3D bioplotting of embryonic stem cells. Biofabrication.

[9] Pant, A., Lee, A.Y., Karyappa, R., Lee, C.P., An, J., Hashimoto, M., Tan, U., Wong, G., Chua, C.K., Zhang, Y. (2021). 3D food printing of fresh vegetables using food hydrocolloids for dysphagic patients. Food Hydrocoll., 114:106546.

[10] Tomasevic, I., Putnik, P., Valjak, F., Pavlic, B., Sojic, B., Markovinovic, A.B., Kovacevic, D.B. (2021). 3D printing as novel tool for fruit-based functional food production. Curr. Opin. Food, 41:138 - 145.

[11] Severini, C., Derossi, A., Ricci, I., Caporizzi, R., Fiore, A. (2018). Printing a blend of fruit and vegetables. New advances on critical variables and shelf life of 3D edible objects. J. Food Eng., 220:89 - 100.

[12] Derossi, A., Paolillo, M., Verboven, P., Nicolai, B., Severini, C. (2022). Extending 3D food printing application: Apple tissue microstructure as a digital model to create innovative cereal-based snacks. J. Food Eng., 316:110845.

[13] Lin, J. H., Liang, C. W., & Chang, Y. H. (2016). Effect of starch source on gel properties of kappa-carrageenan-starch dispersions. Food Hydrocoll., 60:509 - 515.

[14] Liu, Z., Bhandari, B., Prakash, S., Zhang, M. (2018). Creation of internal structure of mashed potato construct by 3D printing and its textural properties. Food Res. Int., 111:534 -543.

[15] Sweeney, M., Campbell, L. L., Hanson, J., Pantoya, M. L., & Christopher, G. F. (2017). Characterizing the feasi-bility of processing wet granular materials to improve rheology for 3D printing. J. Mater. Sci., 52(22):13040 - 13053.

[16] Zhang, Y., Sharan, S., Rinnan, Å., Orlien, V. (2021) Survey on Methods for Investigating Protein Functionality and Related Molecular Characteristics. Foods. 10 (11):2848.

[17] Dong, H., Wang, P., Yang, Z., Xu, X. (2023). 3D printing based on meat materials: Challenges and opportunities. Current Research in Food Science. 6: 100423.

[18] Lakes, R. (2009). Viscoelastic Materials. Cambridge University Press, 3: 480. ISBN 978-0-521-88568-3.

[19] Liu, Y., Liu, D., Wei, G., Ma, Y., Bhandari, B., Zhou, P. (2018). 3D printed milk protein food simulant: Improving the printing performance of milk protein concentration by incorporating whey protein isolate. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 49: 116 - 126.

[20] García-Segovia, P., García-Alcaraz, V., Balasch-Parisi, S., Martínez-Monzó, J. (2020). 3D printing of gels based on xanthan/konjac gums. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 64: 102343.

[21] Warner, E.L., Norton, I.T., Mills, T.B. (2019). Comparing the viscoelastic properties of gelatin and different concentrations of kappa-carrageenan mixtures for additive manufacturing applications. Journal of Food Engineering, 246: 58 - 66.

[22] Mathobo, V. M., Silungwe, H., Ramashia, S. E., & Anyasi, T. A. (2020). Effects of heat moisture treatment on the thermal, functional properties and composition of cereal legume and tuber starches-a review. Journal of Food Science and Technology -Mysore 58, 412-426.

[23] Godoi, Fernanda C.; Prakash, Sangeeta; Bhandari, Bhesh R. (2016): 3d printing technologies applied for food design: Status and prospects. In Journal of Food Engineering 179, pp. 44-54.

[24] Zhang, John Y.; Pandya, Janam K.; McClements, David Julian; Lu, Jiakai; Kinchla, Amanda J. (2022): Advance-ments in 3D food printing: a comprehensive overview of properties and opportunities. In Critical reviews in food science and nutrition 62 (17), pp. 4752-4768.

[25] He, Y., Yang, F., Zhao, H., Gao, Q., Xia, B., Fu, J. (2016). Research on the printability of hydrogels in 3D bi-oprinting. Scientific Reports.

[26] Bragante, A.G., Desenvolvendo produto alimentício - Conceitos e Metodologia - SP Brasil. 2014 Clube de Autores.

[27] Lille, M., Nurmela, A., Nordlund, A., Metsa-Kortelainen, S., Sozer, N. (2018). Applicability of protein and ?ber-rich food materials in extrusion-based 3D printing. J. Food Eng., 220:20 - 27.

[28] Alghooneh, A., Razavi, S.M.A., Kasapis, S. A. (2020). New Approach to Distinguish Thixotropic and Viscoelastic Phenomena. Food Biophysics, 15: 72 - 84.

[29] Liu, L., Yang, X., Bhandari, B., Meng, Y., Prakash, S. (2020). Optimization of the Formulation and Properties of 3D-Printed Complex Egg White Protein Objects. Foods, 9: 164.

[30] Qiu, L., Zhang, M., Bhandari, B., Chitrakar, B., Chang, L. (2023). Investigation of 3D printing of apple and edible rose blends as a dysphagia food. Food Hydrocolloids, 135: 108184.

[31] Warner, E.L., Norton, I.T., Mills, T.B. (2019). Comparing the viscoelastic properties of gelatin and different concentrations of kappa-carrageenan mixtures for additive manufacturing applications. Journal of Food Engineering, 246: 58 - 66.

[32] Jonkers, N., van Dommelen, J.A.W., Geers, M.G.D. (2022). An anisotropic elasto-viscoplastic-damage model for Selective Laser Sintered food. Eng. Fract. Mech., 266: 108368.

[33] Zhang, J., Li, Y., Cai, Y., Ahmad, I., Zhang, A., Ding, Y., Qiu, Y., Zhang, G., Tang, W., Lyu, F. (2022). Hot extrusion 3D printing technologies based on starchy food: A review. Carbohydr. Polym., 294: 119763.

[34] Keerthana, K., Anukiruthika, T., Moses, J.A., Anandharamakrishnan, C. (2020). Development of fiber-enriched 3D printed snacks from alternative foods: A study on button mushroom. Journal of Food Engineering, 287: 110116.



PRODUÇÃO E AVALIAÇÃO DA RUGOSIDADE SUPERFICIAL DE INSERTOS MOLDANTES POLIMÉRICOS PARA A MOLDAÇÃO POR INJEÇÃO DE LOGOTIPOS AUTOMÓVEIS

Bruno Coelho[1,2], Cátia Silva[1,2], Leandro Fernandes[1,2], Sérgio J. Rodrigues[1,2], Jorge Ferreira[4], Sandra Carvalho[5], Álvaro M. Sampaio[1,2,5], António J. Pontes[1,2]

1 Departamento de Engenharia de Polímeros, IPC –Instituto de Polímeros e Compósitos, Universidade do Minho
2 DONE Lab – Advanced Manufacturing of Products and Tools, Universidade do Minho
3 KLC – Technical Plastics
4 Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra
5 Lab2PT, Escola de Arquitetura, Universidade do Minho

O presente trabalho visa o aprofundamento e o desenvolvimento do conhecimento necessário à aplicação da tecnologia de PVD (Physical Vapor Deposition) na produção de logotipos 3D para a indústria automóvel. No sentido de encontrar soluções para reduzir o tempo de desenvolvimento de um produto e custos com ferramentas em séries curtas de produção, foi desenvolvido um estudo enquadrado no conceito de molde híbrido, em que insertos moldantes foram adaptados a uma estrutura de um molde convencional de injeção já existente. A possibilidade de recorrer a moldes híbridos permite avaliar e validar pormenores particulares quando um novo logotipo está a ser desenvolvido, antes da produção para o mercado. Este trabalho descreve o processo de desenvolvimento e fabrico de insertos moldantes poliméricos considerando dois materiais e tecnologias distintas: Digital ABS da tecnologia Material Jetting (MJ) e High Temp V2 da tecnologia SLA (Stereolithography). Em particular, é observada a influência de parâmetros do processo de fabrico aditivo e de operações de acabamento superficial, mais concretamente na rugosidade de insertos moldantes.

1. INTRODUÇÃO

O conceito de molde híbrido pressupõe a combinação de tecnologias de produção convencionais e não convencionais e/ou de materiais para os insertos moldantes como é demonstrado na Figura 1. Neste enquadramento, um molde híbrido tipicamente apresenta: (i) uma estrutura normalizada, produzida através de técnicas de fabrico subtrativo recorrendo tipicamente a ligas metálicas, que funciona como estrutura de apoio aos insertos moldantes e sistemas funcionais (e.g. sistema de injeção, sistema de refrigeração); e, (ii) insertos moldantes produzidos num outro material e/ou tecnologia [1,2].

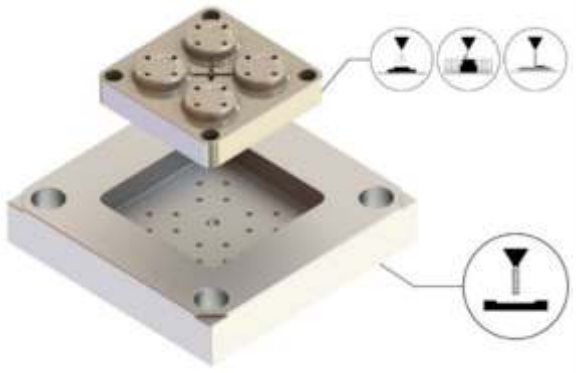


FIGURA 1
Conceito de molde híbrido [5]

Para a produção de insertos moldantes, a

indústria tem vindo a recorrer de forma mais frequente a tecnologias de fabrico aditivo que apresentam variados tipos de materiais de construção (e.g. termoplásticos, ligas metálicas, polímeros fotossensíveis) com propriedades distintas, e que, por permitirem que a construção decorra camada-a-camada, possibilitam a definição de estruturas mais complexas e canais de controlo térmico conformados e otimizados à forma da peça que são inviáveis por métodos subtrativos convencionais. A combinação tecnológica entre o fabrico subtrativo e o aditivo possibilita o desenvolvimento de produtos de uma forma mais rápida e eficiente para o mercado, com possibilidade de melhorar os tempos de produção e resultante qualidade do produto por incluírem sistemas de controlo de temperatura conformados, e também, com a facilidade de customização de produtos por permitir de uma forma rápida (em comparação com processos convencionais) trocar insertos moldantes conforme necessário [3,4].

Em relação ao processo de fabrico aditivo, os parâmetros que são possíveis de variar e que têm influência na qualidade resultante das peças são a altura de camada, a orientação e inclinação. No que concerne às tecnologias poliméricas, a literatura aborda essencialmente a definição dos valores mais adequados para a orientação e foca-se essencialmente em peças planas. Basile et al. [6] efetuaram um estudo sobre materiais de SLA e a influência da orientação de construção no fabrico de moldes com microestruturas para aplicações médicas. Nesse estudo variaram a orientação em 0°, 15° e 90° tendo obtido melhores resultados em termos de rugosidade e de definição das microestruturas quando recorreram a uma inclinação de 0°. Noutro artigo científico, Arnold et al. [7] reportaram que uma inclinação de 15° permitiu melhorar a qualidade de superfície (menor rugosidade). A geometria da peça afeta a deposição das camadas de material, bem como o efeito escada resultante.

O caso de estudo consiste em duas geometrias que amplificam o efeito 3D das formas e são representativas para o mercado de logotipos (Figura 2).

Neste trabalho, desenvolveu-se uma solução enquadrada no conceito de molde híbrido. Para tal, foram reutilizadas as estruturas de um molde de injeção (aço de liga 1.2343), exceto os postiços da bucha e da cavidade. Trata-se de um molde de canais frios, com duas cavidades e injeção em leque, construído somente a partir de processos subtrativos de maquinagem convencional (Figura 3).



(a)

(b)

(c)

FIGURA 2
Geometria da peça com logotipo: (a) face inferior da peça com o logotipo "KLC"; (b) face inferior da peça com o logotipo "I9LOGO"; e (c) face superior/visível que é idêntica para ambas as peças.

2. MOLDE HÍBRIDO

2.1 MATERIAIS PARA OS INSERTOS MOLDANTES

O material que irá compor os insertos moldantes deverá, por um lado, suportar os esforços inerentes do processo de injeção do policarbonato escolhido (Makrolon® 2407-PC, Covestro) e, por outro lado, apresentar um acabamento com uma rugosidade de superfície média (Ra) £ 2 µm. Para o fabrico dos insertos moldantes, foram selecionados os materiais Digital ABS da tecnologia Material Jetting e High Temp V2 da tecnologia SLA.

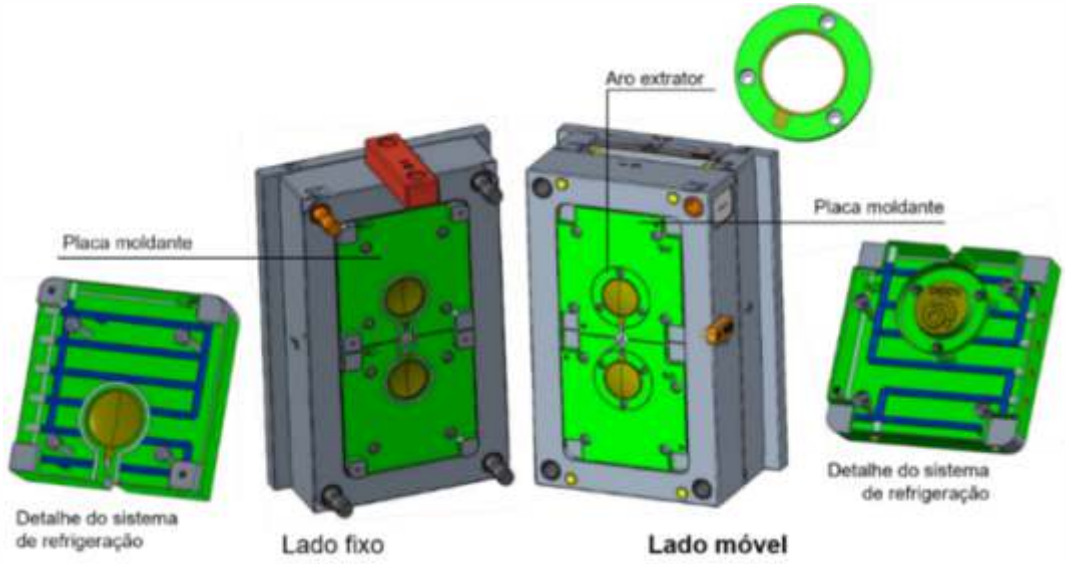


FIGURA 3
Estrutura do molde convencional existente para a moldação das peças

2.2 ANÁLISE DE PARÂMETROS DO PROCESSO DE FABRICO ADITIVO NO ACABAMENTO SUPERFICIAL

No sentido de produzir insertos moldantes com a melhor qualidade de superfície possível, foi investigado o efeito de aspetos críticos do processo de fabrico aditivo, nomeadamente a orientação, isto é, a inclinação da peça em relação à plataforma de construção.

Em termos de altura de camada, existem limitações relacionadas com o equipamento e o tipo de material. No caso do Digital ABS, 30 µm é o valor mínimo possível enquanto, no material High Temp V2, é possível aplicar uma altura mínima de camada de 25 µm. Em relação à orientação durante a construção, no caso do material Digital ABS, devido à geometria das peças do caso de estudo, uma simples variação da orientação levaria à necessidade de incluir material de suporte, o que modificaria o acabamento superficial (zonas com acabamento "matte"), afetando assim, o Ra. Como tal, para este caso foi utilizada uma inclinação de 0°. No que respeita ao material High Temp V2, de forma a definir os melhores ângulos, foi realizada a produção prévia de amostras da peça com o logotipo "I9LOGO" para as orientações 0°, 15° e 90° em relação à plataforma de construção. Na amostra produzida a 90°, foi verificada a presença de suportes na zona das letras "LOGO". Além desta limitação, o tempo de produção foi drasticamente superior, comparativamente às outras duas orientações, o que se traduz num maior custo de produção. Considerando este resultado, foi excluído do estudo a orientação a 90° e optou-se por um valor intermédio de 45°.
As amostras produzidas foram avaliadas em termos de rugosidade média de superfície em 5 zonas (Figura 4). Os ensaios foram realizados com o perfilómetro de contacto Mitutoyo SURFTEST SJ-500 considerando a norma ISO 4287.



FIGURA 4
Representação da localização das 5 zonas onde se realizaram as medições

Em termos gerais, as amostras em Digital ABS (30 µm, 0°) atingem o requisito pretendido, apresentando para todas as zonas medidas, um valor de Ra inferior a 2 µm. Em relação às amostras em High Temp V2, verificou-se que estas apresentam sempre um valor de Ra acima do requisito. Para as três orientações definidas, a amostra produzida a 45°, foi aquela que apresentou os valores mais próximos do requisito, para todas as zonas medidas (Figura 5).

2.3 INFLUÊNCIA DO POLIMENTO NA RUGOSIDADE DE AMOSTRAS EM HIGH TEMP V2

Na zona do logotipo (Figura 6b), foi realizado um teste de polimento, a fim de avaliar a qualidade do acabamento das peças em High Temp V2. Para o teste, foi selecionada a amostra com uma

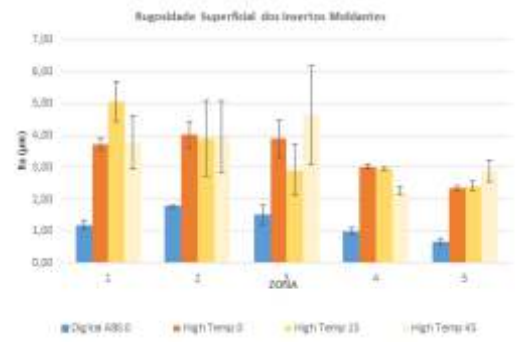


FIGURA 5
Rugosidade média de superfície (Ra) para as amostras produzidas

altura de camada de 25 µm e uma inclinação em relação à plataforma de construção de 0°, por reduzir o tempo de produção em comparação com as amostras a 15° e a 45°. A Figura 6 apresenta o registo fotográfico da amostra High Temp V2, onde é notória a variação da superfície no local do logotipo.

Para avaliar a influência do polimento na rugosidade média de superfície da amostra, foi efetuada a medição deste parâmetro, antes e após o tratamento. Os resultados da medição do valor de Ra da amostra, nas duas zonas em análise (Figura 7b) e para as distintas direções definidas encontram-se na Tabela 1.

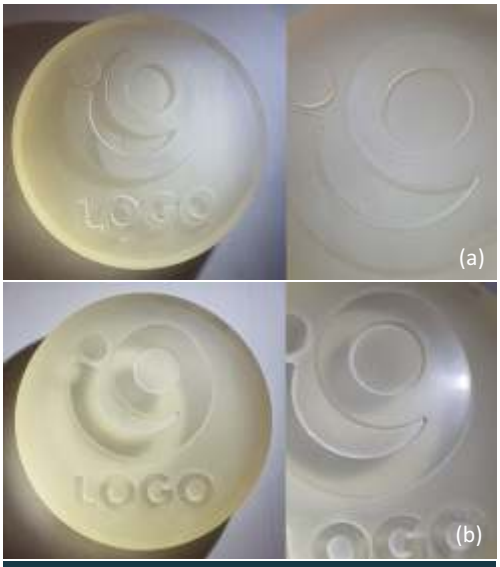


FIGURA 6
Amostra do inserto moldante em High Temp V2: (a) antes do polimento; e (b) após o polimento.



FIGURA 7
Ensaios de medição da a) Rugosidade média de superfície e b) Zonas avaliadas na amostra.

Os resultados da medição mostram que o polimento torna a amostra viável não só em termos visuais, mas também em relação à rugosidade média de superfície, para ser aplicada como inserto moldante no molde híbrido.

2.4 PROJETO DO MOLDE DE INJEÇÃO

O molde híbrido incorpora na placa das cavidades e buchas, porta-insertos fabricados numa liga de alumínio, através de processos de maquinagem convencional. Os sistemas de alimentação e de extração do molde híbrido não sofreram alterações comparativamente ao molde convencional. O sistema de refrigeração foi maquinado apenas nos porta-insertos (Figura 8a e Figura 8b), pois a colocação de circuitos de refrigeração em insertos poliméricos não é eficiente, devido à sua baixa condutividade térmica e baixa tensão de cedência [8,9]. A Figura 8 mostra os insertos moldantes poliméricos projetados para a obtenção das peças do caso de estudo.

Os insertos moldantes da bucha foram projetados de modo a conterem uma base em alumínio e a parte moldante em material polimérico (Figura 9).

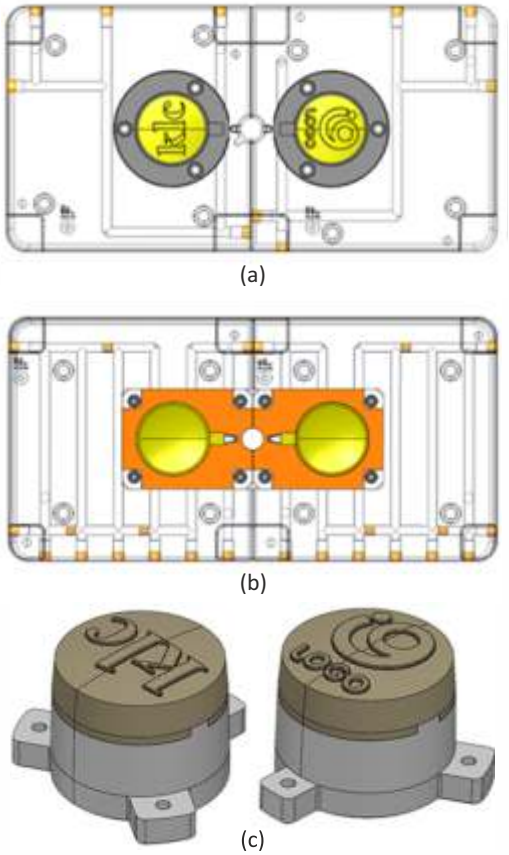
2.5 PRODUÇÃO DOS INSERTOS MOLDANTES

2.5.1 HIGH TEMP V2

Os insertos moldantes em High Temp V2 foram produzidos no equipamento Formlabs Form 3 (Figura 10). A Tabela 3 apresenta informações referentes ao fabrico e pós-processamento dos insertos poliméricos da cavidade e bucha.

TABELA 1
Resultados da medição da rugosidade média de superfície (Ra) da amostra High Temp V2/25 µm/0º.

	Ra [µm]			
	Zona 1		*Zona 2*	
	Direção 1	*Direção 2*	*Direção 1*	*Direção 2*
Sem Polimento	**5,49**	**4,14**	**5,26**	**4,49**
Com Polimento	**0,66**	**0,67**	**0,40**	**0,41**



(a)

(b)

(c)

FIGURA 8
Porta-insertos da placa da (a) Bucha com layout dos canais de refrigeração e (b) Cavidade com layout dos canais de refrigeração; (c) Insertos moldantes da placa da bucha.



FIGURA 9
Estrutura dos insertos da bucha: parte moldante em material polimérico e a base em alumínio.



FIGURA 10
Produção dos insertos moldantes em High Temp V2 na tecnologia SLA.

TABELA 2
Informações relativas ao fabrico dos insertos da cavidade e da bucha.

Material	High Temp Resin V2 (FLHTAM02)
Altura de camada	25 µm
Orientação	0°
Limpeza pós-produção	Limpeza automatizada com álcool isopropílico (IPA)
Condições de pós-cura	Cura térmica e por luz UV: 80°C, 120 minutos
Pós-Processamento	Fabrico subtrativo em máquina CNC para retificação

2.5.2 DIGITAL ABS

A produção dos insertos moldantes em Digital ABS ocorreu no equipamento Stratasys Objet500 Connex 3, considerando acabamento glossy e modo digital (30 µm) (Figura 11). No final da produção, os insertos moldantes foram submetidos a um tratamento térmico (procedimento B [10]). A Tabela 3 apresenta informações relativas à produção e pós-processamento dos insertos da cavidade e bucha.

TABELA 3
Informações referentes ao fabrico e pós-processamento dos insertos poliméricos.

Material	Digital ABS (RGD515 + RGD531)
Altura de camada	30 µm
Orientação	0°
Limpeza pós-produção	Limpeza com jato de água para remoção do material de suporte
Tratamento térmico	Colocação dos insertos moldantes num forno com diferentes taxas de aquecimento a fim de aumentar a temperatura de HDT

2.6 POLIMENTO DOS INSERTOS MOLDANTES

Após a fase de fabrico, foi realizado o polimento manual dos insertos moldantes em High Temp V2 e Digital ABS, antes da sua montagem nos porta-insertos. O polimento englobou um processo manual recorrendo a diversas lixas com diferentes gramagens (600, 1000, 2000 e 5000), terminando com uma massa de polir. Na Figura 12 está ilustrado o acabamento das



FIGURA 11
Produção dos insertos moldantes em Digital ABS na tecnologia MJ.

superfícies dos insertos moldantes em High Temp V2 e Digital ABS, no final do processo de polimento manual.

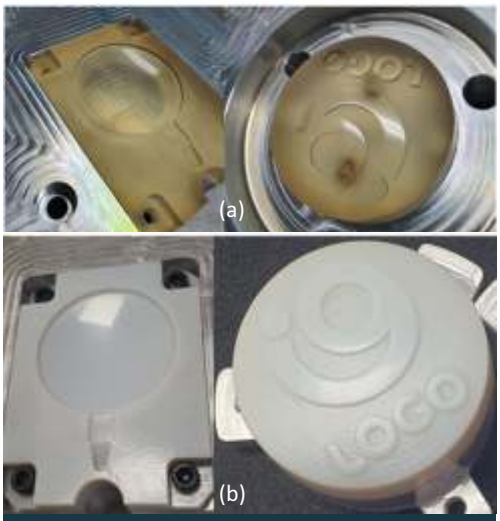


FIGURA 12
Acabamento superficial obtido nos insertos em: a) High Temp V2 e b) Digital ABS.

3. MOLDAÇÃO POR INJEÇÃO DOS INSERTOS POLIMÉRICOS

Foram realizados um conjunto de ensaios com os insertos moldantes projetados e fabricados para a produção das duas peças desenvolvidas para o efeito. Na Figura 13 podem ser observados os insertos moldantes montados no molde. As peças obtidas com os insertos em High Temp V2 são apresentadas na Figura 14a e em Digital ABS na Figura 14b, respetivamente.

Após o processamento por injeção das peças, estas foram submetidas aos processos de tampografia e PVD. A Figura 15 apresenta o acabamento final de uma das peças obtidas com os insertos moldantes em Digital ABS.

4. CONCLUSÕES

O estudo sobre a aplicação de materiais poliméricos de fabrico aditivo em moldes híbridos sugere as seguintes conclusões:

a) É possível a obtenção direta de superfícies com valores de Ra inferiores a 2 µm em geometrias côncavas, através da tecnologia MJ

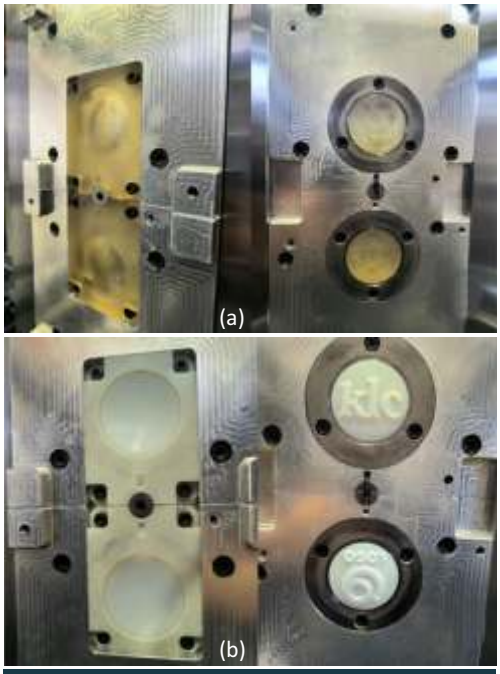


FIGURA 13
Molde Híbrido com os insertos moldantes em: a) High Temp V2 e b) Digital ABS.

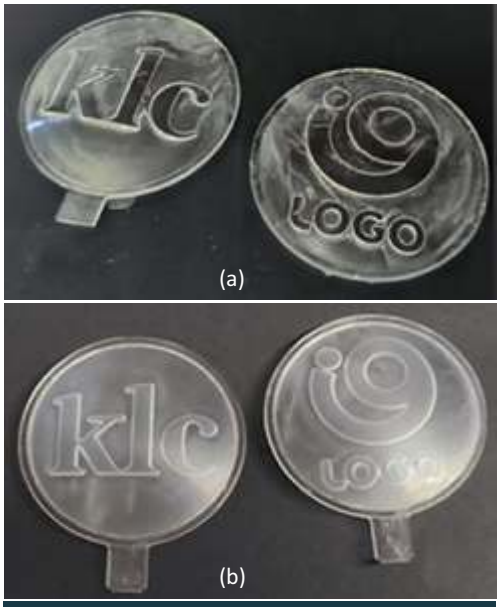


FIGURA 14
Moldações obtidas com os insertos poliméricos em a) Digital ABS e b) High Temp V2.



FIGURA 15
Aspeto final de uma das peças injetadas após ter sido submetida aos processos de tampografia e PVD

considerando o material Digital ABS e os parâmetros de processo de 30 µm para a altura de camada e de 0° para a orientação.

b) É possível executar polimento sobre os insertos moldantes a fim de melhorar o acabamento superficial.

c) Verificou-se uma rápida degradação da superfície moldante dos insertos em High Temp V2 no processamento de peças em policarbonato.

d) Verificou-se uma menor resistência do material Digital ABS às pressões e temperaturas desenvolvidas durante o processo de moldação por injeção, comparativamente ao material High Temp V2.

e) É possível a moldação de termoplásticos de engenharia exigentes, isto é, que requerem temperaturas de processamento elevadas (>280°C), a partir de insertos moldantes em Digital ABS.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi apoiado por: Fundos Europeus Estruturais e de Investimento na componente FEDER, através do Programa Operacional de Competitividade e Internacionalização (COMPETE 2020) [Projecto nº 72607; Referência de Financiamento: POCI-01-0247-FEDER-072607].

5. REFERÊNCIAS

[1] Mateus, A., Gago, P., Oliveira, V., Saraiva, V.M., Lima, M., Monteiro, A.C., Pouzada, A.S.. Hybrid moulds - integration of alternative materials and manufacturing processes. In: 16th International Conference on Production Research, Prague, Czech Republic. 2001.

[2] Pontes, A. J., Gago, P., Bártolo, P. J., Soares, R., & Pouzada, A. S.. Hibridmolde - A Project Towards the New Mould Generation. O Molde - Revista Da Cefamol, Associação Nacional de Indústria de Moldes, 66, pp. 16-20. 2005.

[3] K.V. Wong, A. Hernandez, "A Review of Additive Manufacturing", ISRN Mechanical Engineering, vol. 2012, no. 208760 pp. 1 - 10. 2012.

[4] Pouzada, A.S.. Hybrid moulds: A case of integration of alternative materials and rapid prototyping for tooling. Virtual and Physical Prototyping, Vol. 4, No. 4, pp. 195-202. 2009.

[5] Rodrigues, S. J., Pereira, A. B., Silva, E. C., Silva, C. S., Silva, S., Portinha, A., Bernardo, P., Sampaio, A. M., Pontes, A. J., "Time and cost comparison of conventional and hybrid moulds for the injection of heatsink parts" in PPI Conference 2022 - Lavrion, Greece. 2022.

[6] Basile, V., Modica, F., Surace, R., Fassi, I., "Micro-texturing of molds via Stereolithography for the fabrication of medical componentes", V CIRP Conference on Biomanufacturing, No. 110, pp. 93-98. 2022.

[7] Arnold C., Monsees, D., Hey, J., Schweyen, R., "Surface Quality of 3D-Printed Models as a Function of Various Printing Parameters", Materials, Vol. 12, No. 12. 2019.

[8] Silva, E. C., Silva, Sampaio, A. M., Pontes, A. J., Thermal performance of additive manufacturing materials for hybrid moulds. O Molde, 120:57-67. 2019.

[9] Shinde, M. S., Ashtankar, K. M., Additive manufacturing-assisted conformal cooling channels in mold manufacturing processes. Advances in Mechanical Engineering.

[10] Stratasys, Polyjet Best Practice - Digital ABS. URL: https://www.advancedtek.com/wp-content/uploads/2016/08/Best_Practice_-_Digital_ABS_-_Web_English_11-15.pdf

INOV.AM INTERNATIONAL CONFERENCE

FIRST EDITION

SHAPING TOMORROW

Academic and industry experts from around the world will come together to discuss technologies and advancements in additive manufacturing, aiming to foster discussion, experience sharing, and knowledge exchange.

Additionally, the event will seek to strengthen the academic-industry relationship, focusing on themes such as:

- HYBRID MOULDS
- HYBRID PRODUCTS
- HYBRID MANUFACTURING SYSTEMS
- ADDITIVE MANUFACTURING SYSTEMS
- MATERIALS FOR ADDITIVE MANUFACTURING
- DIGITAL TOOLS FOR ADDITIVE MANUFACTURING

SUBMIT YOUR ABSTRACT UNTIL SEPTEMBER 23rd | REGISTER NOW AT WWW.CONFERENCE.INOV.AM

27-28 NOV 2024 BRAGA · PORTUGAL

WWW.CONFERENCE.INOV.AM

INOV.AM
INNOVATION IN ADDITIVE MANUFACTURING

Mobilizing Agenda for Business Innovation
Additive Manufacturing Innovation

PRR Plano de Recuperação e Resiliência | REPÚBLICA PORTUGUESA | Financiado pela União Europeia NextGenerationEU

Don't just imagine the future, be part of it.

WWW.INOVAM.PT

FABRICO ADITIVO POR EXTRUSÃO DE FILAMENTO METÁLICO NO IST: ENSINO E INVESTIGAÇÃO

Bárbara P. P. A. Gouveia[1,*], João P. G. Magrinho[1], Bernardo M. T. Sousa

1 IDMEC, Instituto Superior Técnico, Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa, Portugal

* Autor correspondente: bgouveia@tecnico.ulisboa.pt
IDMEC, Instituto Superior Técnico, Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa, Portugal.

O processo de fabrico de peças por extrusão de fio metálico é a tecnologia mais recente de fabrico aditivo de peças metálicas, que permite produzir peças com elevado rigor dimensional, com geometrias complexas e furos internos intrincados que seriam difíceis ou impossíveis de produzir com os processos de fabrico tradicionais. Adicionalmente, apresenta a melhor relação custo-benefício, simplicidade e segurança comparativamente aos processos de fabrico aditivo congéneres. Esta tecnologia reúne a construção camada a camada por deposição de filamento, análoga ao fabrico das peças poliméricas, com as operações de pós-processamento para remoção dos ligantes e de sinterização do pó metálico para obter a peça metálica final, comuns ao fabrico por moldação por injeção de metal. Por se tratar de uma tecnologia muito recente com elevado potencial de utilização no atual paradigma da indústria de fabrico de componentes metálicos, a área científica de Tecnologia Mecânica e Gestão Industrial do Departamento de Engenharia Mecânica do Instituto Superior Técnico (IST) complementou as suas infraestruturas laboratoriais com uma impressora comercial dedicada à extrusão de filamentos metálicos para contribuir para a formação dos seus alunos, colaboração com a indústria e simultaneamente possibilitar a consolidação do conhecimento científico sobre a relação entre o processo de fabrico, os seus parâmetros e as propriedades das peças obtidas, através de atividades de investigação numa tecnologia inovadora que se encontra num estado embrionário.

PALAVRAS-CHAVE:
FABRICO ADITIVO (FA); IMPRESSÃO 3D DE METAIS; EXTRUSÃO DE FILAMENTO METÁLICO; PROPRIEDADES MECÂNICAS

1. INTRODUÇÃO

O Fabrico Aditivo (FA) de peças metálicas através do processo de extrusão de material (Material Extrusion, MEX, de acordo com a classificação norma ISO/ASTM 52900 [1]) suscita muito interesse devido à sua relativa acessibilidade e simplicidade. Esta tecnologia permite produzir peças com geometrias complexas e estruturas internas intrincadas (ver Figuras 1 e 4) que seriam difíceis ou impossíveis de produzir com os processos de fabrico tradicionais. Adicionalmente, esta tecnologia apresenta a melhor relação custo-benefício comparativamente aos processos de FA de peças metálicas de fusão em cama de pó (Powder Bed Fusion, PBF), por jato de ligante (Binder Jetting, BJ), ou por deposição de energia dirigida (Directed Energy Deposition, DED). Este processo de fabrico de extrusão de metais resulta da combinação da impressão 3D camada a camada por extrusão de filamentos poliméricos/compósitos, em impressoras de filamento fundido, com a matéria-prima utilizada no já consolidado processo de moldação por injeção de metal (Metal Injection Moulding, MIM). Ao contrário dos restantes processos de FA de peças metálicas que utilizam pó solto, a matéria-prima em forma de filamento flexível é composta de pós metálicos ligados a uma matriz polimérica que funciona como



FIGURA 1
Peças produzidas por extrusão de filamento metálico: depois de impressas na impressora Forge1 e na forma final depois de sinterizadas

sistema de ligação dando origem a uma matéria-prima segura.

O desenvolvimento da tecnologia de fabrico de peças metálicas por extrusão de filamento fundido teve origem na ciência de materiais e na metalurgia através da investigação e desenvolvimento de filamentos metálicos para serem utilizados nas impressoras de materiais poliméricos existentes, e no estudo aprofundado das operações de pós processamento para remoção do material ligante e subsequente sinterização das peças produzidas com estes novos filamentos, a partir do conhecimento já existente do processo de fabrico MIM. A qualidade e o potencial das peças produzidas nos primeiros estudos relativos ao fabrico de peças metálicas por extrusão de filamento fundido, associados à simplicidade e segurança deste processo de fabrico, tem atraído nos últimos 10 anos, a atenção crescente da indústria e da comunidade académica, retratada pela evolução exponencial no número de publicações em revistas da especialidade. Esta tecnologia permite projetar, criar, desenvolver e produzir peças com liberdade de design, flexibilidade e versatilidade em relação aos processos de fabrico tradicionais, sendo possível produzir componentes metálicos leves com estruturas internas e de geometria complexa, relevantes para um conjunto alargado de aplicações nos setores automóvel, aeroespacial, biomédico, bem como para os consumidores finais e para o mercado em geral.

O reflexo do potencial industrial desta tecnologia aditiva foi o investimento que houve no desenvolvimento de filamentos metálicos comerciais, como por exemplo os que foram desenvolvidos pela BASF Forward AM, AM Technologies GmbH [2] ou pela The Virtual Foundry, Inc. [3], e de impressoras dedicadas à utilização de filamentos metálicos, como a MetalX da Markforged e a Forge1 da Raised3D, ou o Studio System da Desktop Metal, para o qual, embora a matéria prima não seja fornecida em forma de filamento, a pressão de extrusão é análoga à das impressoras de filamentos [5].

2. FA POR EXTRUSÃO DE FILAMENTO METÁLICO

À semelhança da impressão de peças poliméricas por filamento fundido, o filamento composto por pó metálico e um conjunto de ligantes poliméricos é aquecido a uma temperatura acima do ponto de fusão dos materiais ligantes através da cabeça de impressão aquecida, sendo o material extrudido na forma pastosa através do bico de extrusão (*nozzle*) sobre uma mesa de impressão aquecida. A deposição do material extrudido é realizada camada a camada, com a cabeça de impressão ligada a um sistema de dois eixos horizontais que permite realizar as trajetórias para deposição do filamento no plano XY, e assim contruir cada camada da peça. No fim de cada camada, a mesa de impressão desloca-se no sentido descendente do eixo vertical (Z), uma quantida-de correspondente à espessura da camada, para dar início à impressão da camada seguinte até ao fabrico da geometria final. A peça final produzida constituída por pó metálico e ligan-tes poliméricos, designada de peça "verde", requer duas etapas de pós processamento, uma primeira operação de remoção do materi-al ligante (designada por *debinding*), após a qual a peça é designada de "castanha" e a segunda de sinterização do pó metálico (desi-gnada por *sintering*) para obter a peça metálica consolidada. Após a operação de *debinding*, a peça castanha é relativamente porosa com uma resistência mecânica inferior à da peça verde, mas mantém a integridade estrutural devido a alguns elementos do ligante que permanecem na peça. Depois de concluída a sinterização, a peça totalmente metálica está pronta a ser utilizada, ou pode ser pós processada através das tradicionais operações de acabamento da superfície para melhorar as tolerâncias de fabrico, ou eventualmente de tratamentos térmicos.

Durante a etapa de sinterização da peça porosa verifica-se uma diminuição do seu volume (cuja variação depende da geometria da peça, do perfil de impressão e da composição do filamento) com a consequente alteração nas dimensões exteriores da peça. Sendo por isso necessário compensar esta contração previamente através da impressão do modelo 3D com dimensões superiores à peça final, dependente da contração prevista em cada um dos eixos.

Tal como acontece com qualquer processo de fabrico por extrusão de filamentos, é necessário introduzir estruturas de suporte durante a impressão em zonas das peças onde existam saliências ou outras estruturas horizontais, mas no caso do fabrico de componentes metálicos é necessário aumentar estas estruturas de suporte para evitar o colapso e garantir a integridade estrutural das peças durante todo o processo de *debinding* e *sintering*. Para além das estruturas de suporte, que não fazem parte da peça a imprimir, é ainda comum, na impressão 3D por filamento, imprimir outros elementos adicionais para promover a adesão do modelo à mesa de impressão e dar-lhe estabilidade durante a impressão. No caso da impressão de

filamento metálico, o elemento adicional mais relevante para promover a adesão da peça durante a impressão consiste numa placa, com dimensões superiores à peça no plano XY, impressa com poucas camadas antes de se iniciar a impressão da peça, que se designa por raft, e que se encontra ilustrada nas Figuras 1, 4 e 6. Esta placa, sobre a qual ainda é depositada uma camada de material de suporte de interface com a peça, desempenha um papel importante nas etapas de *debinding* e *sintering*, porque irá ter uma contração uniforme solidária com a peça para minimizar os fenómenos de distorção e empeno que podem ocorrer nas operações de pós-processamento, sendo por isso designa-da muitas vez de *skrinkage plate*.

3. O FABRICO DE COMPONENTES METÁLICOS POR EXTRUSÃO DE FILAMENTO NA FAMÍLIA DOS PROCESSOS DE FA: VANTAGENS, DESAFIOS E LIMITAÇÕES

Ao contrário dos processos de fabrico tradicionais, como a maquinagem, a soldadura, o forjamento, ou a fundição, que estão tecnologicamente consolidados, devido a muitos anos de existência, os processos de FA, por terem surgido nas últimas décadas, e apesar estarem a ter um desenvolvimento muito significativo, ainda apresentam desafios científicos e tecnológicos relevantes, para melhorar as propriedades mecânicas, metalúrgicas, a qualidade das peças obtidas e a repetibilidade. A título de exemplo, e porque as características e limitações de cada um dos tipos de processos aditi-vos é diferente, as peças metálicas produzidas por FA podem apresentar anisotropia, propriedades mecânicas inferiores às obtidas nas peças fabricadas pelos processos tradicionais, menor resistência à fadiga, porosidade, tensões residuais elevadas, rugosidade superficial significativa, distorções, entre outros. Ultrapassar estas limitações e obter um conhecimento profundo sobre a relação entre o processo de fabrico, os seus parâmetros, a microestrutura e as propriedades das peças obtidas, para obter através do FA peças com propriedades consistentes, são tópicos de investigação prementes, que fundamentam a intensa atividade de investigação e desenvolvimento na atualidade.

Apesar destes desafios, os processos de FA de metais apresentam vantagens técnicas claras sobre os processos de fabrico tradicionais nomeadamente para produzir peças na forma quase final com geometrias ou com estruturas internas complexas, e leves, com poupança significativa de material que, de outra forma, seriam demasiado dispendiosas, demoradas ou até impossíveis de fabricar.

Os processos de FA de metais e as suas vantagens refletem-se no interesse crescente da indústria apresentando-se com um papel importante para aumentar a sua eficiência, flexibilidade, produtividade, melhorar a sua sustentabilidade e contribuir para a economia circular.

O processo de fabrico de peças por extrusão de fio metálico é a tecnologia mais recente de FA de peças metálicas. Por isso mesmo em 2015 ainda não se encontrava classificada como um processo de FA para materiais metálicos na norma ISO/ASTM 52900. Embora este processo de fabrico utilize a estratégia de impressão 3D camada a camada por extrusão de filamentos poliméricos, sobre a qual já existe um amplo conhecimento, a investigação e desenvolvimento de novos filamentos flexíveis metálicos, a otimização dos parâmetros de impressão, bem como o estabelecimento das condições adequadas de pós-processamento das peças verdes para diferentes filamentos metálicos, e a relação com as propriedades mecânicas, a integridade estrutural e as características geométricas e microestruturais das peças metálicas obtidas, são tópicos desafiantes e determinantes para o amadurecimento desta tecnologia de fabrico, que se encontra ainda muito pouco explorada e consolidada.

As peças fabricadas por este processo de fabrico têm características intrínsecas à forma de construção da peça verde, que ocorre por deposição do material extrudido através do orifício circular do bico de extrusão (*nozzle*), descrevendo trajetórias de deposição no plano XY para construção de cada camada dando origem a espaços entre os filamentos depositados, que resultam em alguma porosidade nas peças mesmo após a sinterização. Esta porosidade entre camadas faz com que as peças produzidas sejam geralmente caracterizadas por uma menor resistência mecânica ou ductili-dade quando sujeitas a esforços de tração na direção perpendicular aos planos das camadas. Ainda inerente à forma como a impressão da peça é feita, se as contrações geométricas das peças nas operações de pós-processamento forem corretamente consideradas antes da impressão, as peças metálicas produzidas apresentam uma boa precisão geométrica, mas são caracterizadas por rugosidade superficial associada ao efeito geométrico das camadas, conforme ilustra a Figura 2, e, à semelhança dos processos aditivos congéneres, as peças podem ser acabadas com operações manuais ou automatizadas de polimento, jato de areia ou fresagem

para obter a geometria e/ou o acabamento superficial necessário. Acresce ainda que, no FA por extrusão de filamento metálico, algumas destas operações podem ser facilitadas por poderem ser realizadas na peça ainda no estado verde, minimizando ou dispensando operações de acabamento na peça metálica final. As características das peças metálicas produzidas por extrusão, que podem ser limitativas para algumas aplicações, devem ser alvo de investigação aprofundada uma vez que podem ser mitigadas através da escolha adequada dos parâmetros de impressão, da qualidade do filamento e das condições operatórias das etapas de *debinding* e *sintering*.



(a) (b)

FIGURA 2
Cubos de aço inoxidável 316L com 12 mm de lado, impressos no Instituto Superior Técnico (IST), com duas camadas exteriores e (a) com padrão de enchimento retilíneo com o ângulo de deposição, em relação ao eixo x da mesa de impressão, de +45º/-45º, e densidade de enchimento de 100% (b) com padrão de enchimento triangular e densidade de enchimento de 50%

Importa, no entanto, referir que, é precisamente através da construção camada a camada das peças que, ao contrário dos processos tradicionais de fabrico, é agora possível fabricar peças metálicas customizadas, com geometrias complexas e estruturas internas intrincadas, o que abriu um novo paradigma no projeto das peças metálicas e no seu fabrico. As novas metodologias de projeto, Design for *Additive Manufacturing*, consideram as características intrínsecas do FA camada a camada, a orientação mais adequada da peça durante a sua construção, a localização dos suportes, entre outros fatores, e coadjuvadas por ferramentas de otimização topológica e de design generativo abrem a possibilidade de fabricar peças com geometrias inovadoras e estruturalmente resistentes.

Embora todos os materiais metálicos sinterizáveis possam ser utilizados no fabrico de peças por extrusão de filamento, como por exemplo o bronze, o cobre, as ligas de alumínio, as ligas de cobalto e de níquel, as ligas de titânio, os aços inoxidáveis e os aços carbono, conforme reportado nas publicações científicas do meio académico, ainda não se encontram disponíveis filamentos comerciais numa gama tão alargada de materiais [6]. É por isso importante investir no desenvolvimento de mais filamentos, bem como nas inerentes operações de *debinding* e *sintering* que permitam alargar os campos de aplicação e as indústrias onde se utilizam as peças produzidas por esta tecnologia, que permite produzir com precisão dimensional e rapidez uma gama diversificada de objetos, como protótipos, componentes funcionais, ferramentas, modelos, entre outros. Até porque, quando comparado com os restantes processos de FA de componentes metálicos, o processo de extrusão destaca-se pela utilização de equipamentos custo mais acessível, com simplicidade e segurança, por utilizar matéria-prima em forma de filamento flexível que permite o manuseamento seguro ao contrário dos processos que utilizam pó metálico solto e ainda por não necessitar de fontes energia com elevada potência.

4. FA POR EXTRUSÃO DE FILAMENTO METÁLICO NO IST

No contexto atual acima descrito e na persecução da inovação e dos desafios tecnológicos na área do FA, a área científica de Tecnologia Mecânica e de Gestão Industrial do Departamento de Engenharia Mecânica do Instituto Superior Técnico (IST), complementou as suas infraestruturas laboratoriais de FA por filamento fundido com uma impressora de extrusão de metais Forge1, da Raise3D (ver Figura 3). A proximidade a esta tecnologia em rápido desenvolvimento e expansão, para a qual ainda existem desafios permitirá, através das atividades de ensino, contribuir para a formação dos seus alunos e em consequência permitir transmissão de conhecimento para a indústria. Simultaneamente, através das atividades de investigação e desenvolvimento, pretende-se contribuir para o amadurecimento do conhecimento científico sobre a relação entre o processo de fabrico, os seus parâmetros, as estruturas e as propriedades das peças obtidas, nesta área das tecnologias mais inovadoras na atual indústria de fabrico de componentes metálicos.

A impressora 3D de filamento Forge1, faz parte do sistema integrado MetalFuse da Raise 3D Technologies, Inc. [4], que é composto por esta impressora dedicada a filamentos metálicos, pelo forno catalítico D200-E para remoção dos elementos ligantes e pelo forno de sinterização S200-C. Este sistema foi desenvolvido em estreita colaboração com a BASF, como parceira de materiais e elevada experiência no fabrico MIM. A impressora permite um volume de construção de 300×300×300 mm, dispõe de

duas cabeças de extrusão, e um suporte de bobines que permite acomodar a bobine dos filamentos metálicos Ultrafuse® desenvolvidos pela BASF e pela Forward AM (316L e 17-4 PH), e a bobine com o filamento de suporte, Support Layer. Este filamento de suporte cerâmico, cujas partículas não sinterizam por terem temperaturas para a difusão no estado sólido superiores às dos pós metálicos, permite uma fácil remoção manual dos suportes da peça e a sua separação do raft após as operações de *debinding* e *sintering*.

O software de *slicing* deste sistema é o ideaMaker for Metals, para o qual foram desenvolvidos perfis de impressão otimizados, com a colaboração da BASF Forward AM, que permitem uma impressão rigorosa das peças com os filamentos de metal Ultrafuse®.



FIGURA 3
Impressora por extrusão de filamento metálico Forge1, da RAISE3D [4]

Os trabalhos iniciais de investigação desenvolvidos no IST foram elaborados no âmbito de dissertações de Mestrado em Engenharia Mecânica e Engenharia Biomédica com o objetivo de estudar a porosidade, a densidade e a precisão dimensional dos produtos fabricados por esta tecnologia, assim como determinar as suas propriedades mecânicas em diferentes estados de tensão/deformação com o filamento Ultrafuse® 316L (que é constituído por cerca de 90% em peso de aço inoxidável [7]) de 1,75 mm de diâmetro, com percentagens de enchimento de 100%, e em estruturas com padrões e percentagens de enchimento diferentes (ver Figura 4). Destes trabalhos de investigação alargados sintetizam-se aqui somente alguns dos resultados relativos aos ensaios de tração e compressão de provetes com densidade de enchimento de 100%.

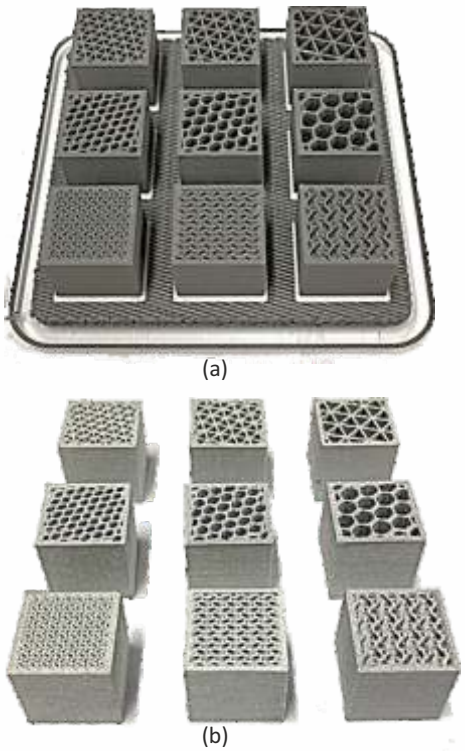


FIGURA 4
Provetes cúbicos aço inoxidável 316L, destinados a estudos para aplicação biomédica, com padrão de enchimento giroíde (em baixo), favo de mel (ao meio) e triângulos (em cima), em densidades de enchimento de 65%, 50% e 35% (da esquerda para direita) e com duas paredes de contorno exterior (a) depois de impressos no estado green e (b) e no final após o pós-processamento de debinding e sintering

As propriedades mecânicas à tração foram avaliadas de acordo com a norma ASTM E8/E8M em provetes com 50 mm e 6 mm de comprimento e largura, respetivamente, na zona de referência e espessura de 4 mm. Para avaliar a influência da direção de impressão nas propriedades das peças impressas por esta tecnologia de fabrico, os provetes de tração foram impressos em diferentes direções, alinhados com os eixos de impressão X, Y, e Z, como ilustra a Figura 5, tendo sido fabricados 3 provetes de cada tipo. As propriedades mecânicas à compressão foram analisadas através de provetes cúbicos com um volume de 12x12x12 mm, seguindo as recomendações da norma ASTM E9. Para avaliar a influência da direção de impressão nas propriedades mecânicas, os provetes de compressão (na Figura 2 (a)) foram testados alinhados com os diferentes eixos de impressão. Para compensar a contração associada aos tratamentos de pós-processamento as dimensões de todos os provetes foram aumentadas em 19% nas direções XX e YY e 22% em ZZ, antes da impressão.

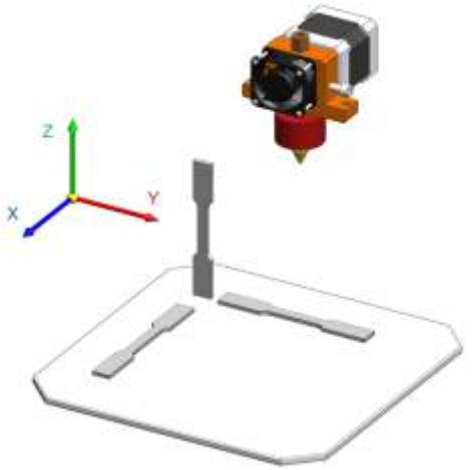


FIGURA 5
Esboço dos provetes de tração alinhados com os 3 eixos da impressora

Todos os provetes foram impressos com um bico de extrusão (*nozzle*) de 0,4 mm e com os mesmos parâmetros de impressão, dos quais se destacam a espessura de camada de 150 microns, 2 camadas de parede exterior, padrão de enchimento retilíneo com o ângulo de deposição, em relação ao eixo x da mesa de impressão, de +45°°/-45°, alternado entre camadas consecutivas, e com densidade de enchimento de 100% a que corresponderão as propriedades mecânicas máximas das peças obtidas por esta tecnologia de fabrico. A Figura 6 ilustra a pré-visua-lização da impressão dos provetes cúbicos fabricados para avaliar a precisão dimensional, a rugosidade, a densidade e as propriedades mecânicas à compressão das peças metálicas impressas nas condições acima referidas. Esta pré-visualização refere-se ao instante corres-pondente ao final da camada 45, onde é possível observar as 2 camadas de parede exterior (*inner shell* e *outer shell*), o padrão de enchimento (*infill*) retilíneo com o ângulo de deposição de-45° (nesta camada), o *raft* e a interface de *dense support*.

Os tratamentos de pós-processamento de *debinding* e *sintering* foram realizados na Elnik Systems GmbH, parceiro da BASF Forward AM.

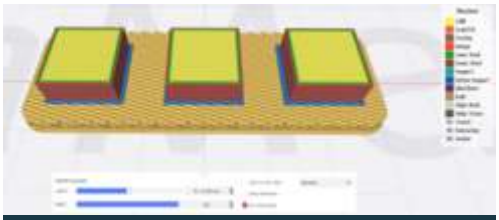


FIGURA 6
Pré-visualização no ideaMaker for Metals da estratégia de impressão de provetes cúbicos com densidade de enchimento de 100% no final da camada 45

Metals da estratégia de impressão de provetes cúbicos com densidade de enchimento de 100% no final da camada 45

Os ensaios de tração (ilustrados na Figura 7) foram realizados na máquina de ensaios mecânicos Instron 5966 (INSTRON, Norwood, MA, EUA), com uma célula de carga de 200 kN, e em regime quasi-estático considerando uma velocidade constante de 5 mm/min. A evolução dos deslocamentos e das extensões na superfície dos provetes foi obtida através de um sistema digital de correlação de imagem, Dantec Dynamics Model Q-400 3D. O sistema DIC possui duas câmaras, cada uma com uma resolução de 6 megapixéis e uma distância focal de 50,2 mm com abertura de f/11. A frequência de aquisição das imagens foi definida em 10 frames por segundo e o algoritmo de correlação foi realizado no software INSTRA 4D - v.4.9.0.182 179. Para aumentar a precisão das medições, utilizou-se uma fonte de luz para iluminar toda a superfície dos provetes que foi previamente pintada de branco com um padrão estocástico de pontos pretos.

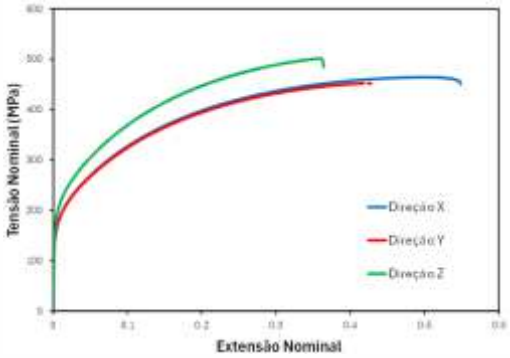


FIGURA 7
Ensaio de tração na máquina de ensaios mecânicos Instron 5966, com sistema digital de correlação de imagem, Dantec Dynamics Model Q-400 3D

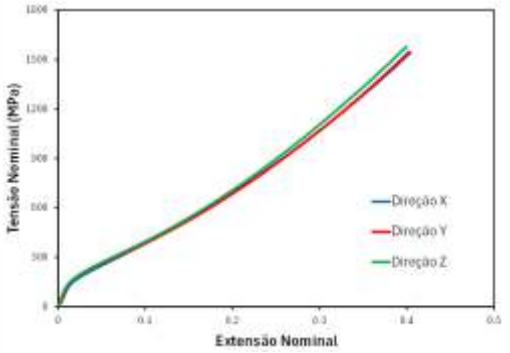
Os ensaios de compressão foram realizados na máquina de ensaios mecânicos Instron Satec 1200 (INSTRON, Norwood, MA, EUA), com uma célula de carga de 1200 kN. Foi utilizada uma velocidade constante de 2,5 mm/min. A evolução dos deslocamentos e das extensões na superfície dos provetes também foi obtida com recurso ao sistema digital de correlação de imagem, Dantec Dynamics Model Q-400 3D, utilizando os mesmos parâmetros dos ensaios de tração. Para eliminar o efeito do atrito nos resultados procedeu-se à lubrificação das interfaces entre os provetes e os pratos compressores em todos os ensaios.

As evoluções de tensão-extensão dos ensaios de tração e compressão nas 3 direções perpendiculares entre si encontram-se representadas

na Figura 8 (a) e (b), respetivamente. A Tabela 1 apresenta os valores médios das principais propriedades dos ensaios de tração.



(a)



(b)

FIGURA 8
Curvas tensão nominal - extensão nominal do aço 316L obtidas através dos ensaios de (a) tração uniaxial e de (b) compressão uniaxial.

Os resultados dos ensaios de tração dos provetes imprimidos nas direções de impressão X e Y são similares, permitindo concluir que estas direções de impressão no plano da mesa (XY) não influenciam a resistência mecânica do aço inoxidável 316L. O coeficiente de anisotropia obtido para esses dois casos revela que, durante o ensaio de tração, a deformação dos provetes na direção da espessura foi superior à deformação na direção da largura. Este resultado indica que a resistência mecânica dos provetes na direção da espessura (Z) será inferior à do plano (XY). Por outro lado, a curva de tração do provete impresso na direção Z demonstra uma superioridade em relação às demais. É importante destacar que este resultado pode ser justificado pela otimização de parâmetros que foi necessária para possibilitar a impressão do provete na direção Z, devido ao seu elevado índice de esbeltez.

Em relação aos resultados de compressão, globalmente, são análogos com os resultados de tração, na medida em que os provetes testados nas direções X e Y apresentam resultados muito semelhantes, enquanto os provetes testados na direção Z com uma curva tensão-extensão ligeiramente superior, demonstram ter uma resistência mecânica ligeiramente mais elevada. É importante salientar que, para os provetes de compressão, não houve a necessidade de otimizar qualquer parâmetro de impressão e que os provetes foram todos impressos numa única disposição na mesa de impressão tendo-se somente procedido à sua rotação nos ensaios de compressão para avaliar as suas propriedades segundo os 3 eixos de impressão.

Os resultados apresentados mostram o potencial e a viabilidade desta tecnologia para a produção de diversos tipos de componentes metálicos, destacando-se os componentes com solicitações de compressão, tais como, componentes ativos de ferramentas.

5. CONCLUSÕES

O FA por extrusão de filamento metálico demonstra um elevado potencial para a produção de peças metálicas com geometrias complexas e estruturas internas intrincadas, oferecendo vantagens significativas em termos de custo-benefício, simplicidade e segurança em comparação com outras tecnologias de FA de metais. A integração desta tecnologia no Instituto Superior Técnico (IST) permite não só avançar na formação dos estudantes, como também na contribuição para a investigação e desenvolvimento neste campo emergente e projetos com a indústria.

Os estudos realizados no IST com a impressora Forge1 evidenciam que é possível obter peças metálicas com boas propriedades mecânicas, e que a alteração dos parâmetros de impressão permite melhorar as propriedades mecânicas das peças produzidas. Embora não sejam aqui apresentados resultados relativos ao filamento

TABELA 1
Propriedades mecânicas médias do aço 316L à tração.

Direção de impressão	Módulo de elasticidade (GPa)	Tensão de cedência (MPa)	Tensão de rotura (MPa)	Alongamento na fratura (%)	Coeficiente de anisotropia
X	**185.7**	**150.5**	**464.8**	**57.0**	**0.756**
Y	**172.3**	**154.0**	**452.0**	**42.8**	**0.649**
Z	**162.2**	**176.3**	**501.9**	**37.8**	**0.931**

de aço inoxidável 17-4PH da Ultrafuse®, os resultados obtidos revelaram uma resistência mecânica significativamente superior ao aço inoxidável 316L, permitindo aplicações onde os esforços mecânicos assim o exijam. Estes resultados evidenciam também a necessidade do desenvolvimento contínuo de novos filamentos metálicos e das respetivas operações de pós-processamento, que são essenciais para melhorar a consistência e a qualidade das peças fabricadas, bem como conhecer as contrações durante a sinterização, essenciais na fase de design e para garantir a precisão dimensional das peças finais.

Os resultados obtidos demonstram que o FA por extrusão de filamento metálico é uma tecnologia promissora, especialmente para aplicações que requerem peças customizadas e com geometrias complexas, como nos setores automóvel, aeroespacial e biomédico. O contínuo investimento em investigação e desenvolvimento, bem como na formação de novos engenheiros, será fundamental para a consolidação e expansão desta tecnologia no mercado industrial.

A implementação desta tecnologia no IST reforça a importância da sinergia entre o ensino, a indústria e a investigação, promovendo avanços científicos e tecnológicos que contribuirão significativamente para a indústria de fabrico de componentes metálicos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro da Fundação para a Ciência e a Tecnologia de Portugal (FCT) e do IDMEC através do projeto LAETA financiamento base (DOI: 10.54499/UIDB/50022/2020).
Este trabalho foi suportado pela União Europeia no âmbito do Next Generation EU, através do Plano de Recuperação e Resiliência (PRR) da República Portuguesa, no âmbito do projeto PRODUTECH R3 - "Agenda Mobilizadora da Fileira das Tecnologias de Produção para a Reindustrialização".
Os autores também agradecem à RAISE3D Technologies, Inc. a cedência de imagens para esta publicação.

REFERÊNCIAS

[1] ISO/ASTM 52900: additive manufacturing - general principles - terminology, Int. Stand. (2021)

[2] Ultrafuse Metal filaments, Forward AM, BASF, https://forward-am.com/material-portfolio/ultrafuse-filaments-for-fused-filaments-fabrication-fff/metal-filaments/

[3] Filamet, The Virtual Foundry, https://thevirtualfoundry.com/products/

[4] MetalFuse, RAISE3D, technologies, Inc., https://www.raise3d.com/metalfuse/

[5] L. Waalkes, J. Längerich, F. Holbe, C. Emmelmann, Feasibility study on piston-based feedstock fabrication with Ti-6Al-4V metal injection molding feedstock, Addit Manuf, 35 (2020), Article 101207, https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101207

[6] N.K. Bankapalli, V. Gupta, P. Saxena, A. Bajpai, C. Lahoda, J. Polte, Filament fabrication and subsequent additive manufacturing, debinding, and intering for extrusion based metal additive manufacturing and their applications: a review, Composites, Part B, 264 (2023), Article 110915. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2023.110915

[7] C. Wang, W. Mai, Q. Shi, Z. Liu, Q. Pan, J. Peng, Effect of printing parameters on mechanical properties and dimensional accuracy of 316L stainless steel fabricated by fused filament fabrication, J. Mater. Eng. Perform. (2023), https://doi.org/10.1007/s11665-023-08848-8

DESENVOLVIMENTO E INVESTIGAÇÃO EM MATERIAIS E FABRICO AVANÇADO NA UNIVERSIDADE DE MACAU

Valentino A.M. Cristino[1*], Chi Tat Kwok[1,2]

1 Department of Electromechanical Engineering, University of Macau, Macao Special Administrative Region of China
2 Institute of Applied Physics and Materials Engineering, University of Macau, Macao Special Administrative Region of China
***** Autor correspondente: vcristino@um.edu.mo

O Departamento de Engenharia Electromecânica (DEEM) da Faculdade de Ciência e Tecnologia da Universidade de Macau foi criada em 1990, oferecendo programas de licenciatura, mestrado e doutoramento nas diversas áreas de especialidade da engenharia mecânica e eléctrica. O DEEM tem como missão principal a formação de profissionais nas áreas de engenharia para satisfazer as necessidades locais, mas também na investigação em serviços de infraestruturas e construção, energia, projeto, controlo de sistemas, materiais, fabrico e gestão. O grupo de investigação em materiais e fabrico avançado é responsável pelo ensino e investigação nos tópicos relacionados pela área do DEEM, é atualmente liderado pelo professor Chi Tat Kwok com os professores Kin Ho Lo e Valentino A. M. Cristino como membros, com vários alunos de doutoramento e mestrado, integrados nos diversos trabalhos de investigação.

ACTIVIDADES DE INVESTIGAÇÃO

A infraestrutura laboratorial do DEEM está bem consolidada, de onde se destacam: (i) Laboratório de Metalografia e Corrosão, (ii) Laboratório de Caracterização e Ensaios Mecânicos, (iii) Laboratório de Tribologia, e (iv) Laboratório de Processamento a Laser.



FIGURA 1
Alguns dos equipamentos existentes nos laboratórios do DEEM: (a) Microscópio SEM Hitachi S-3400N, (b) Perfilómetro óptico Bruker ContourGT, (c) máquina de ensaios Advance Instruments SCC-SSRT (50kN) e (d) máquina de fabrico aditivo através da tecnologia de fusão a laser em cama de pó SLM280.

A investigação do grupo está focada no desenvolvimento de novos materiais e processos de fabrico, e no estudo do seu impacto em aplicações de engenharia; otimização de produtos usando novos materiais com propriedades específicas e multifuncionais (p. ex. mecânico, térmico, químico e biológico), mais duráveis e energeticamente mais eficientes, minimizando o seu impacto ambiental e custo de fabrico; estudos em controlo e proteção contra corrosão, resistência à erosão e à cavitação, desenvolvimento de revestimentos protetores/bioativos, fabrico avançado (processamento a laser, processamento por fricção linear); fabrico aditivo (prototipagem rápida, impressão 3D, fusão a laser em cama de pó) e processos de fabrico híbridos inovadores com potenciais aplicações industriais. O grupo publica regularmente vários artigos em revista de especialidade como Corrosion Science, Journal of Materials Science & Technology, Materials and Design, Wear, Journal of Materials Processing Technology, entre outros. A colaboração de investigação do grupo inclui vários institutos nacionais e internacionais como Universidade de Lisboa (Instituto Superior Técnico), ShangHai Jiao Tong University, South China University of Technology, City University of Hong Kong e com várias empresas industriais da região.

O grupo tem publicado vários trabalhos na produção de ligas superficiais a laser (laser surface alloying) com propriedades antibacterianas em materiais como Ti6Al4V com materiais como cobre e prata usando um laser de díodo de alta potência (ver figuras 2 e 3), analisando a influência do teor do material aditivo na microsestrutura e propriedades mecânicas e electroquímicas do material processado.

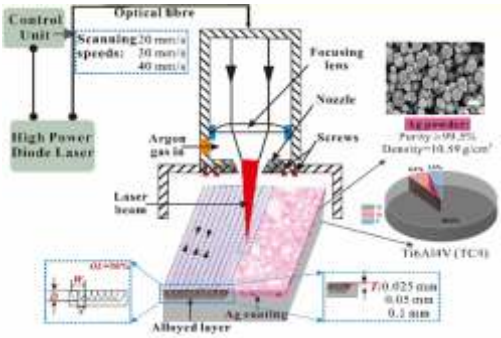


FIGURA 2
Representação esquemática de ligas superficiais a laser usando um laser de díodo de alta potência.

Outros trabalhos do grupo em colaboração com a City University of Hong Kong focam-se em estudos de ligas de alta entropia, analizando a microestrutura e cavitação por erosão da liga CoCrFeNi produzida por fundição em molde de cobre arrefecido por água (ver Figura 4).

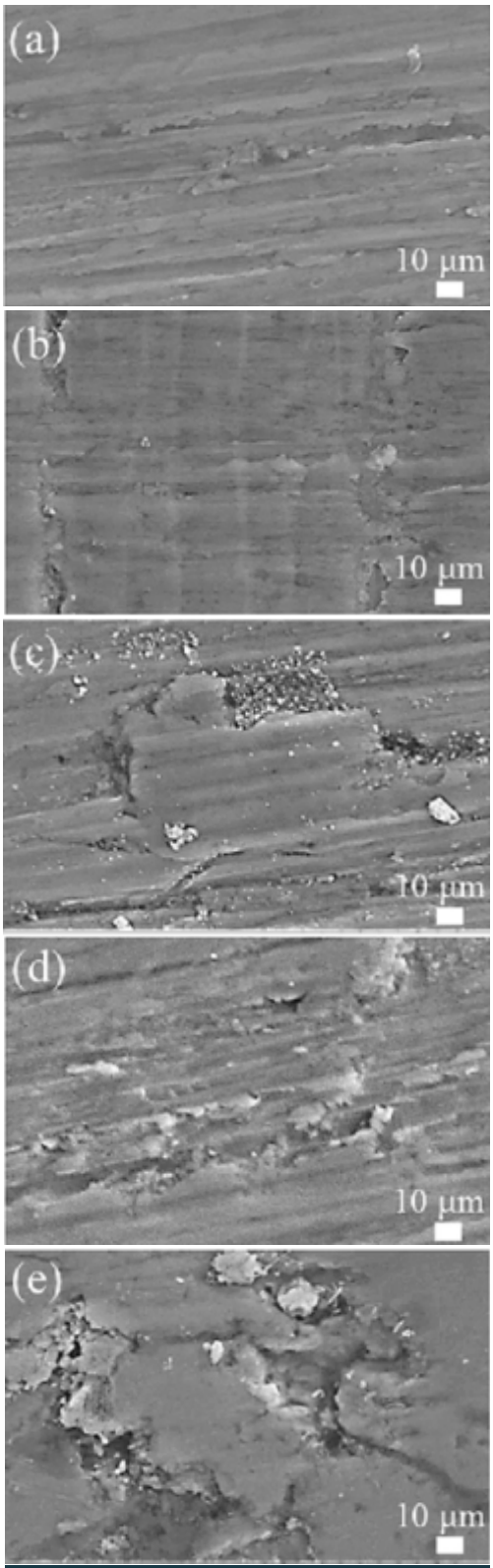


FIGURA 3
Micrografias SEM das superfícies corroídas das amostras das ligas superficiais a laser de Ti6Al4V com teor de prata a (a) 5 %, (b) 8 %, (c) 12%, (d) 14 % e (e) 24 % (percentagens em peso) depois teste de polarização em solução de NaCl a 0,9% em peso a 37ºC [1].

O grupo publicou recentemente um estudo no Engineering Failure Analysis sobre os problemas relacionados com as propriedades electroquímicas e mecânicas de materiais de substituição

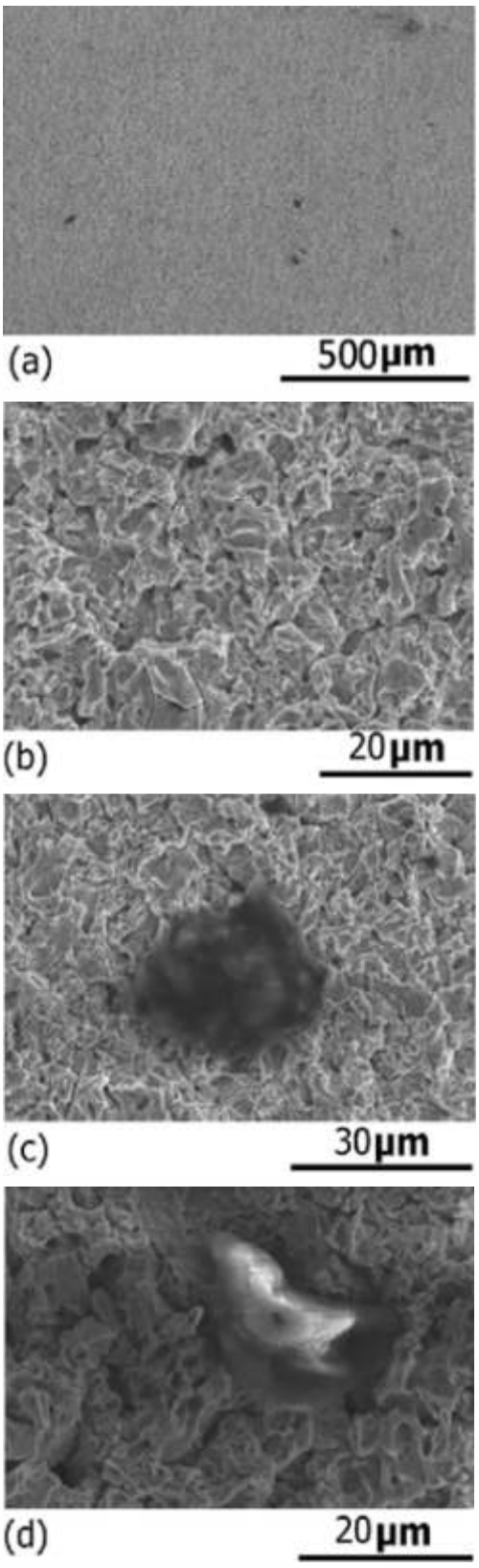


FIGURA 4
(a) Superfície das amostras da liga CoCrFeNi depois dos ensaios de cavitação por erosão (5 h), (b) Morfologia do dano escamoso, (c) região segregada com deficiência de oxigénio e (d) partícula rica em oxigénio [2].

abaixo do padrão para aços inoxidáveis das séries 200 e 300 com aço inoxidável 'limite' de cromo-manganês para aplicações menos exigentes, através de ensaios de corrosão e tração em diferentes condições como temperatura, meios e velocidades de deformação (ver Figura 5).

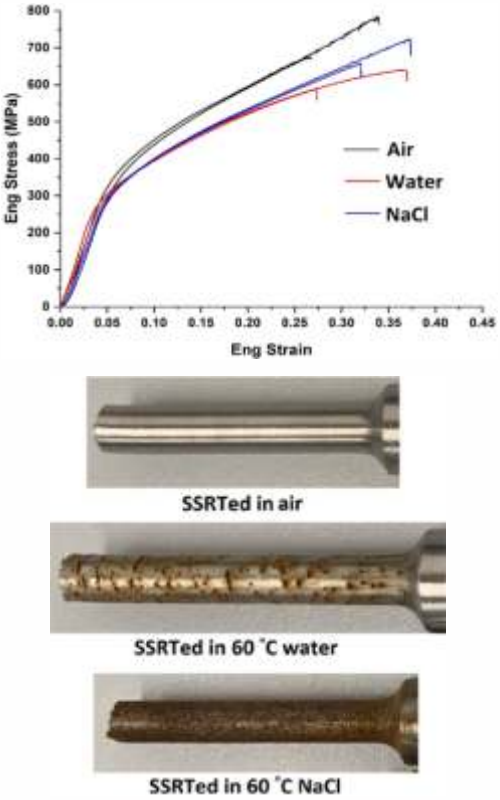


FIGURA 5
Curvas de tensão-extensão nominais do aço inoxidável 'limite' de cromo-manganês a baixa velocidade de deformação em diferentes meios, e fotografia dos provetes depois dos ensaios de tracção a baixa velocidade de deformação em diferentes meios. [3]

Na investigação em fabrico avançado, o grupo tem realizado trabalhos com colaboração com o Instituto Superior Técnico como a utilização a estampagem incremental para produzir ranhuras de reforço em peças metálicas finas depositadas através de fabrico aditivo por fio e arco elétrico, com uma análise comparativa experimental do material depositado com o material comercial, analisando a evolução das extensões durante a deformação e um modelo analítico do processo (ver figuras 6 e 7).

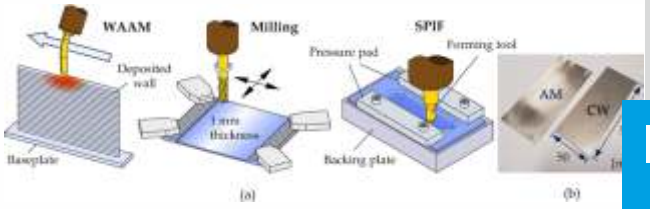
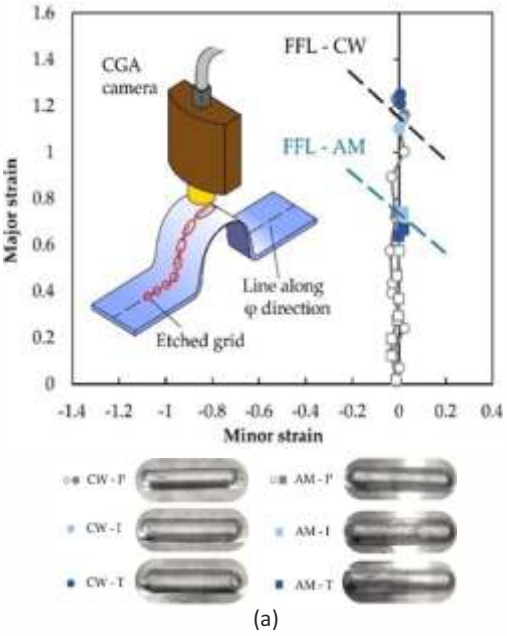


FIGURA 6
(a) *Representação esquemática do processo de fabrico híbrido de ranhuras de reforço em peças metálicas finas. (b) Provetes de chapa utilizados no estudo do material depositado (AM) e adquirido comercialmente (CW).*



(a)



FIGURA 7
(a) *Extensões nas superfícies dos provetes depois dos ensaios de estampagem incremental no espaço das extensões principais; (b) Micrografia do material depositado (superior) e da chapa de aço inoxidável 316L comercial (inferior)* [4].

O grupo também publicou vários trabalhos com a tecnologia de soldadura por fricção linear e as variantes do processo como processamento por fricção linear, deposição superficial por fricção linear, e a utilização de processamento por fricção linear estudos no pós-processamento do material depositado com a tecnologia de fusão a laser em cama de pó. E recentemente, o grupo também está a explorar outras aplicações com esta tecnologia como o desenvolvimento de ligas metálicas com propriedades antibacterianas [5].

REFERÊNCIAS

[1] Q. Qiao, L.M. Tam, V.A.M. Cristino, C.T. Kwok, Surface hardness and corrosion behavior of laser surface-alloyed Ti6Al4V with copper. Surface & Coatings Technology, 444, 128663, 2022; Q. Qiao, L.M. Tam, V.A.M. Cristino, C.T. Kwok, Laser surface alloying of titanium alloy with silver: Microstructure, hardness and corrosion property. Surface & Coatings Technology, 458, 129357, 2023.

[2] Hoi K.C., Lei W.H., Liu Y., Shek C.H., Ferreira J.T.G, Cortez N.F.T., Kwok C.T., Sun Y.F., Cristino V.A.M., Lo K.H., Cavitation erosion of the CoCrFeNi high entropy alloy having elemental segregation. Wear, 530-531, 204990, 2023.

[3] K.H. Chua, C.C. Lama, Y.F. Sun, V.A.M. Cristino, C.T. Kwok, H. Pan, K.H. Lo, Chloride stress corrosion cracking of a non-standard, 'Borderline' Chromium-Manganese stainless steel - Problems of counterfeits and substandard materials, Engineering Failure Analysis, 127, 105562, 2021.

[4] Pragana J.P.M., Cristino V.A.M., Bragança I.M.F., Silva C.M.A. and Martins, P.A.F, Integration of Forming Operations on Hybrid Additive Manufacturing Systems Based on Fusion Welding, International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, 7, 595-670, 2020.

[5] K. Liu, X.M. Chen, L.M. Tam, K.H. Lo, H.z. Wang, V.A.M. Cristino, C.T. Kwok, Combined influence of traverse and rotation speeds in friction stir processing of AlSi10Mg alloy produced by laser-powder bed fusion. Materials Chemistry and Physics, 323, 129585, 2024.

Para mais informações sobre o DEEM pode visitar a página web do departamento através do endereço: https://www.fst.um.edu.mo/eme/

Ou pelo código QR:

APLICAÇÃO DAS TECNOLOGIAS DE FABRICO ADITIVO EM ENGENHARIA DE TECIDOS E MEDICINA REGENERATIVA

João Carlos Silva[1,2*], **Frederico Castelo Ferreira**[1,2*]

1 Department of Bioengineering and iBB - Institute for Bioengineering and Biosciences, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa, Portugal

2 Associate Laboratory i4HB – Institute for Health and Bioeconomy, Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa, Portugal

*Autores correspondentes: joao.f.da.silva@tecnico.ulisboa.pt / frederico.ferreira@tecnico.ulisboa.pt

A fabrico aditivo refere-se a um conjunto de tecnologias de fabrico que permite a construção de objetos físicos em 3D através da deposição controlada de material em camadas, tendo por base modelos digitais CAD (Computer-Aided Design). Ao longo das últimas décadas, o constante desenvolvimento e aperfeiçoamento das tecnologias de fabrico aditivo (FA) permitiu revolucionar as estratégias de engenharia de tecidos e medicina regenerativa. Tal aconteceu devido ao facto das técnicas de FA permitirem a produção de scaffolds com formas e microestruturas muito complexas capazes de mimetizar as propriedades estruturais dos tecidos, com um alto nível de automação, elevada precisão e reprodutibilidade. Estas tecnologias são também totalmente compatíveis com o conceito de medicina personalizada, pois permitem a produção atempada de scaffolds que satisfaçam os requisitos específicos do paciente, em termos do tamanho e geometria da lesão tecidual a reparar. Assim, à luz do conhecimento atual, este artigo pretende apresentar uma visão geral sobre a aplicação das tecnologias de FA na área da engenharia de tecidos, com particular foco nas principais técnicas e biomateriais utilizados. Exemplos de estudos científicos relevantes aplicando técnicas de FA em engenharia de tecidos serão apresentados, terminando-se com a enumeração dos principais desafios que atrasam a translação destes métodos para a prática clínica e com uma previsão das principais tendências futuras nesta área.

PALAVRAS-CHAVE:
BIOFABRICAÇÃO; BIOREATOR; CAD; ENGENHARIA DE TECIDOS; IMPRESSÃO 3D; FABRICO ADITIVAO; MEDICINA REGENERATIVA; *SCAFFOLD.*

1. INTRODUÇÃO

A engenharia de tecidos e a medicina regenerativa são campos interdisciplinares que combinam conhecimento de áreas científicas distintas como biologia, química, e física com princípios de engenharia, tendo como objetivo o desenvolvimento de tecidos e/ou órgãos artificiais (i.e., substitutos biológicos) para reparar, regenerar, melhorar ou substituir tecidos que tenham sofrido uma lesão ou doença [1]. A engenharia de tecidos é definida por três componentes principais (tríade da engenharia de tecidos, Figura 1): as células (primárias, residentes do próprio tecido a regenerar, ou estaminais capazes de se diferenciarem no tipo de célula e tecido pretendido); *scaffolds* que oferecem uma estrutura de suporte para a proliferação e diferenciação celular; e estímulos bioquímicos (i.e., moléculas bioativas e factores de crescimento) ou físicos (i.e., estimulação mecânica ou eléctrica em biorreator) [2]. A escolha ponderada de cada um destes componentes é determinante para o sucesso da estratégia de engenharia de tecidos. Ao longo dos últimos anos, uma grande variedade de combinações de células, biomateriais, métodos de fabrico de *scaffolds*, moléculas bioativas e biorreatores com diferentes configurações tem sido estudados e testados na procura pela obtenção de tecidos artificiais com estrutura e funcionalidade adequadas para aplicação clínica [3].

Os *scaffolds* são compostos por biomateriais e apresentam uma estrutura de suporte tridimensional (3D), funcionando como uma matriz extracelular artificial que deve promover a adesão, migração, proliferação e diferenciação celular ao longo do desenvolvimento e maturação do novo tecido. Como se pode observar na Figura 1, os *scaffolds* podem ser produzidos com

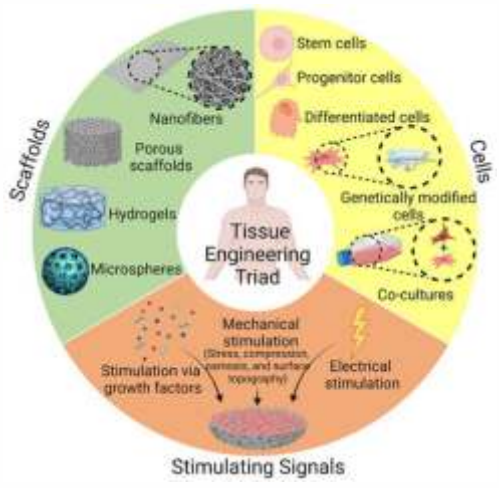


FIGURA 1
Tríade da engenharia de tecidos composta por 3 componentes principais: células, scaffolds e estímulos bioquímicos/físicos que promovem os processos envolvidos na regeneração dos tecidos (reproduzido de [2] com a permissão de MDPI).

diferentes estruturas (por exemplo: nanofibras, hidrogéis, microesferas, esponjas porosas, entre outros) de acordo com as propriedades do tecido que se pretende mimetizar. No entanto, durante o processo de seleção e construção do *scaffold*, algumas condições gerais devem ser respeitadas: i) biocompatibilidade, os mate-riais que constituem o *scaffold* não devem apresentar citotoxicidade para as células nem desencadear nenhuma resposta imunológica ou inflamatória quando implantados; ii) biodegradabilidade (preferencialmente e de acordo com a aplicação), à medida que as células vão proliferando, diferenciando e produzindo a sua própria matriz extracelular, o material do *scaffold* deverá degradar-se, sendo que os subprodutos resultantes da degradação deverão ser não tóxicos e de fácil eliminação pelo organismo; iii) taxa de degradação controlada, isto é, o *scaffold* deverá ser degradado a uma taxa semelhante à da formação do novo tecido, de forma a garantir a organização tridimensional e suporte mecânico; iv) porosidade, elevada interconectividade e área de superfície de forma a promover os processos de adesão, migração e proliferação celular, e vascularização, que é crucial para o sucesso da maioria das estratégias de engenharia de tecidos, mas também facilitar o transporte apropriado de nutrientes/oxigénio e a eliminação de resíduos/ /metabolitos; v) propriedades mecânicas (i.e., módulo de Young, rigidez e flexibilidade) adequadas mimetizando as características do tecido que se pretende regenerar, e para garantir a estabilidade do defeito durante todo o processo de regeneração; vi) fácil esterilização por tratamentos de alta temperatura, exposição à radiação (gama ou ultravioleta) ou via imersão num agente de esterilização, sem que estes processos alterem a biocompatibilidade e propriedades estruturas/mecânicas do *scaffold* [4,5].

O aparecimento das tecnologias de fabrico aditivo (FA) revolucionou a produção de *scaffolds* para engenharia de tecidos, oferecendo importantes vantagens em relação aos métodos convencionais. As principais vantagens introduzidas pelas técnicas de FA foram a possibilidade de produzir *scaffolds* 3D com estruturas bastante complexas e usando vários materiais, de uma forma muito mais rápida, escalável e reprodutível. As tecnologias de FA têm sido vastamente utilizadas em diversas estratégias de engenharia de tecidos e medicina regenerativa com o objetivo de produzir *scaffolds* com estrutura customizada e morfologia interna predefinida, permitindo um alto controlo sobre o tamanho e distribuição dos poros do *scaffold* [6].

Os métodos de FA tem sido também amplamente utilizados na fabrico de biorreatores para a produção e maturação de tecidos artificiais sob condições de cultura controladas e/ou sob estimulação mecânica/eléctrica, recreando de uma forma mais aproximada o microambiente do tecido nativo [7].

Desta forma, este artigo pretende oferecer uma visão geral sobre o uso corrente das tecnologias de FA na emergente área da engenharia de tecidos, enumerando as principais técnicas e biomateriais utilizados e apresentando alguns exemplos de estudos científicos utilizando diferentes métodos de FA para produzir *scaffolds* e biorreatores para estratégias de medicina regenerativa. Os principais desafios por resolver e tendências futuras da aplicação das técnicas de FA em engenharia de tecidos serão também apresentados e discutidos.

2. FABRICO ADITIVO EM MEDICINA REGENERATIVA

Ao longo das últimas duas décadas, as técnicas de FA tem sido amplamente utilizadas em engenharia de tecidos e medicina regenerativa, uma vez que estas permitem a obtenção de estruturas complexas 3D com geometria e tamanho predefinidos. Estas técnicas permitem também obter *scaffolds* com uma arquitetura porosa totalmente interconectada e com tamanho, forma e distribuição dos poros customizada de forma a mimetizar a estrutura do tecido que se pretende regenerar. Para a concepção e design do *scaffold*, a estrutura 3D do defeito e tecido a regenerar podem ser

obtidas através de técnicas de imagem médica usadas no diagnóstico clínico como tomografia computorizada ou ressonância magnética. Os dados obtidos correspondentes ao modelo 3D serão depois tratados por um software de *Computer-Aided Design* (CAD) e o modelo digital criado será transferido para o software do respectivo equipamento de FA. Alternativamente, o modelo 3D do *scaffold* pode também ser desenhado diretamente num software CAD ou desenvolvido através de equações matemáticas para otimização topológica [8]. A maioria dos software de CAD converte o modelo 3D num ficheiro STL que contém toda a informação da estrutura e geometria de superfície do objecto. O ficheiro STL é depois dividido em camadas originando um ficheiro *slice* (SLI) que vai ser importado para o software do equipa-mento de FA, definindo os movimentos que permitirão a construção do objeto [8,9]. Um esquema geral do processo de FA para o fabrico de um tecido artificial para medicina regenerativa é apresentado na Figura 2.

Dependendo do princípio de fabrico, as tecnologias de FA mais utilizadas na produção de *scaffolds* para engenharia de tecidos podem ser categorizadas em quatro grupos: i) estereolitografia (Stereolitography, SLA); ii) modelação por deposição de fundido (*Fused Deposition Modelling*, FDM); iii) sinterização seletiva a laser (*Selective Laser Sintering*, SLS) e iv) impressão *inkjet* 3D (3DP) [8].

A técnica de SLA foi desenvolvida no ano de 1986 e consiste no uso de uma luz ou laser ultravioleta (UV) para polimerizar de forma seletiva cada camada do fotopolímero líquido. Esta técnica necessita de um tanque com um polímero líquido, uma plataforma de construção móvel, uma fonte de luz UV e um scanner. Depois de terminada a polimerização de uma camada de material, a plataforma move-se para uma distância definida e uma camada nova é formada no topo da camada anterior, repetindo-se este processo até ao final da impressão. De seguida, o material não polimerizado é removido e o objecto 3D é submetido a um processo de pós-cura para garantir a polimerização completa da estrutura. Relativamente a outras técnicas de FA, a SLA permite a produção de estruturas com alta qualidade, resolução e reprodutibilidade, sendo que apresenta como principais limitações a necessidade de produzir objetos compostos por um único material, os tempos elevados de impressão, o elevado custo dos polímeros fotossensíveis e a escassez de materiais disponíveis para o processo [8,10].

FDM é uma técnica desenvolvida originalmente em 1992 e que se baseia na extrusão de filamento de polímeros termoplásticos por um *nozzle* (ou cabeça de impressão) aquecido. O filamento é movido para ao *noozle* pela ação de rodas motrizes ou engrenagens, onde é fundido e depositado de uma forma controlada sobre uma plataforma de construção. *O nozzle* move-se no plano xy, depositando o filamento num padrão pré-determinado de acordo com o modelo CAD, sendo que parâmetros relevantes como a temperatura, velocidade de extrusão e velocidade de deslocação do *noozle* são controlados através de um computador. Ao sair do *nozzle*, o material arrefece e solidifica, aderindo à plataforma. Após a conclusão de cada camada, a plataforma move-se no eixo dos zz e o processo de deposição é repetido sobre a camada anterior, até que a produção do objecto 3D esteja completa. As principais vantagens da técnica de FDM em relação aos outros métodos de FA são a sua rapidez de impressão e baixo custo associado num processo livre de solventes

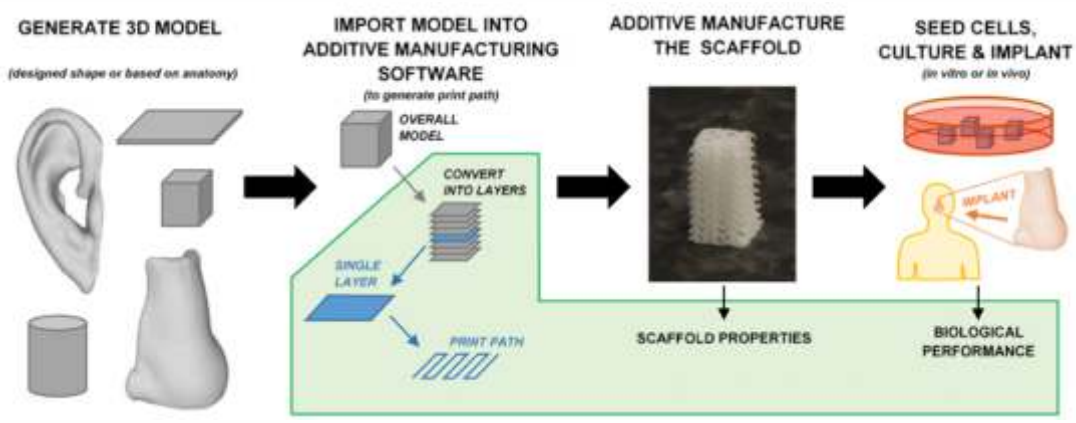


FIGURA 2
Esquema representativo do procedimento geral para a produção de scaffods por fabrico aditivo para estratégias de engenharia de tecidos (adaptado de [9] com a permissão de Springer Nature).

orgânicos, sendo que a baixa resolução que se pode atingir (cerca de 100 m) é considerada uma limitação relevante para determinadas aplicações no contexto da engenharia de tecidos [4,11].

A técnica de SLS tem por base a utilização de um laser de alta potência como fonte de energia para sinterizar (i.e., ligar seletivamente partículas) materiais em pó (por exemplo nylon, poliamida, metais e cerâmicos). A estrutura sólida é criada através do direcionamento do laser de forma automática para pontos no espaço definidos pelo modelo digital 3D. Assim, em vez de usar um laser no processo de cura de resinas fotossensíveis, neste caso a energia do laser é utilizada para aquecer e consolidar, camada a camada de pó de material. Após a produção de uma camada, a plataforma baixa e uma nova camada de material é depositada no topo da anterior pela ação de um rolo mecânico, repetindo-se o procedimento até o objeto 3D estar completo. No processo de SLS, a precisão morfológica e propriedades mecânicas do *scaffold* podem ser controladas através do ajuste de parâmetros como a direção do fabrico, espaçamento e velocidade do varrimento, intensidade do laser, tamanho das partículas de material e espessura da camada. Como vantagens relevantes, a técnica de SLS não requere o uso de estruturas de suporte nem de solventes, permitindo uma alta qualidade de resolução dos objetos impressos. As principais limitações prendem-se essencialmente com a necessidade dos materiais absorverem energia no comprimento de onda do laser, a estreita janela de parâmetros de processamento e os elevados custos não só dos materiais, mas também associados à manutenção dos lasers de alta potência. Do ponto de vista do processo para produção de *scaffolds* para engenharia de tecidos, a limitada quantidade de biomateriais existentes em forma de pós compatíveis com SLS, a difícil remoção de material preso dentro de estruturas complexas e o uso de altas temperaturas que torna esta técnica inapropriada para incorporação de biomoléculas, são importantes limitações a considerar [12].

3DP (impressão *inkjet*) trata-se de uma tecnologia originalmente desenvolvida no MIT no início da década de 90 e que se baseia na deposição controlada de um material ligante sobre uma camada de pó utilizando um cabeça de impressão de jato de tinta (*inkjet*). Após a deposição seletiva do material ligante, a plataforma de construção desce e uma nova camada de material é depositada no topo da anterior, sendo que o processo é repetido até a obtenção da estrutura 3D final. O pó não ligado que compõe cada camada vai atuar como estrutura de suporte para o objeto que está a ser fabricado. Pós-processamento de sinterização pode ser necessário para melhorar as propriedades mecânicas do objeto impresso. As características do *scaffold* podem ser modela-das através do controlo de parâmetros do processo de 3DP como tamanho, rugosidade, forma e molhabilidade do material em pó bem como das reações químicas que se verificam entre o pó e o material ligante. Vantagens como a alta taxa de produção e possibilidade de obter estruturas de grande porte a baixo custo tornam este método atrativo para aplicações industriais. A principais desvantagens da técnica de 3DP incluem o encolhimento dos *scaffolds* após o passo de sinterização, o que pode levar a deformações e fraturas no objecto, adesão mais fraca entre as camadas de material quando comparada com as outras técnicas de FA mencionadas, a difícil remoção do material não-ligado de zonas de geometria complexa, uma elevada rugosidade das superfícies e uma resolução limitada a cerca de 50 m [8,13].

A bioimpressão 3D baseia-se nos mesmos princípios das técnicas de FA enumeradas anteriormente, mas permite a deposição controlada de células vivas e outras biomoléculas encapsuladas num hidrogel com a finalidade de criar tecidos e órgãos artificiais. Estas misturas de biomateriais contendo células vivas dispersas em meio aquoso ou num hidrogel são designadas por biotintas (*bioinks*). Ao contrário das outras técnicas de FA, a técnica de bioimpressão requer um maior controlo das condições complexas do processo de forma a promover uma alta viabilidade das células. Fatores como a manutenção de um ambiente estéril e o adequado controlo de parâmetros como a temperatura e pressão experienciadas pelas células na seringa durante a bioimpressão, bem como a alta biocompatibilidade dos biomateriais utilizados tem de ser estritamente garantidos [14,15].

Considerando as técnicas sumarizadas anteriormente, a Figura 3 apresenta uma representação esquemática das principais tecnologias de FA utilizadas em engenharia de tecidos.

3. MATERIAIS PARA ESTRATÉGIAS DE BIOFABRICAÇÃO

Os biomateriais utilizados no fabrico de *scaffolds* por métodos de FA consistem principalmente em polímeros (naturais ou sintéticos), cerâmicos ou compósitos. Os biomateriais de origem natural apresentam uma maior bioatividade e promovem a adesão e proliferação celular, o que é vantajoso para as estratégias de engenharia de

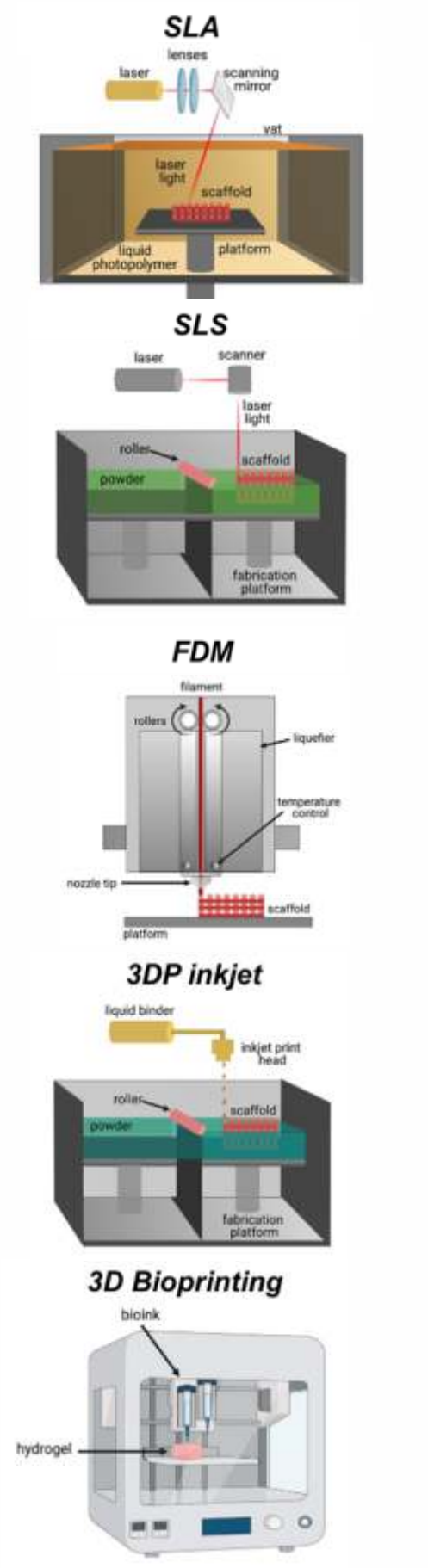


FIGURA 3
Principais técnicas de fabrico aditivo utilizadas em estratégias de engenharia de tecidos e medicina regenerativa (adaptado de [16] com a permissão da Frontiers).

tecidos. No entan-to, estes apresentam uma grande variabilidade de lote para lote, o seu isolamento apresenta custos elevados, são difíceis de processar e as propriedades mecânicas são muitas vezes inadequadas. Por seu lado, os biomateriais sintéticos possuem uma menor performance biológica, mas apresentam uma degradação controlada e propriedades mecânicas mais adequadas, e são também mais facilmente processáveis para uso em tecnologias de FA, conduzindo a uma maior versatilidade e repro-dutibilidade [17]. Os polímeros e cerâmicos utilizados para a produção de *scaffolds* por FA são muitas vezes modificados ou sintetizados para serem compatíveis com uma técnica de FA específica.

A técnica de SLA necessita de materiais fotossensíveis, sendo que os primeiros polímeros desenvolvidos para esta técnica consistiam em resinas baseadas em poliacrilato de baixo peso molecular e monómeros de épóxi, que necessitavam de processamento usando solventes tóxicos. No entanto, ao longo dos anos, polímeros fotossensíveis biodegradáveis e com alta biocompatibilidade foram desenvolvidos, permitindo a expansão desta tecnologia para aplicações nas áreas da biomedicina e medicina regenerativa. Exemplos de polímeros usualmente utilizados em SLA para produzir *scaffolds* incluem poli(fumarato de propileno), carbonato de trimetileno, policaprolactona (PCL), e poli(etileno glicol) (PEG). Hidrogéis fotopolimerizáveis constituídos principalmente por gelatina metacrilada (GelMA), PEG dimetacrilado (PEGDA) e poli(óxido de etileno) (PEO) têm sido combinados com células antes da produção do scaffold por SLA, e os resultados de experiências in vitro demostraram uma grande viabilidade das células encapsuladas [4,10].

SLS tem sido muito utilizada para produzir *scaffolds* de diferentes tipos de materiais, incluindo metais (por exemplo, ligas de titânio), cerâmicos (hidroxiapatite (HAp), trifosfato de cálcio (TCP)), polímeros (PCL, ácido poliláctico (PLA), poli(hidroxibutirato-co-hidroxivalerato) (PHBV) e polieteretercetona (PEEK)) e principalmente compósitos polímero-biocerâmico. A combinação PCL com HAp têm sido muito estudada em estratégias de engenharia de tecidos para a regeneração do tecido ósseo [12,13].

Para serem compatíveis com a técnica de FDM, os materiais têm de ser termoplásticos com uma viscoelasticidade apropriada, capazes de serem processados em forma de filamento, mas também de serem fundidos e de solidificar numa gama de temperaturas compatível com o método. Os principais polímeros usados no

fabrico de *scaffolds* por FDM são o PCL, PLA, PLLA, PEG, poliuretano (PU), e ácido poliglicólico (PLGA) [11]. Biocerâmicos (HAp e TCP), que devido às suas temperaturas de fusão e degradação não podem ser processados diretamente por FDM, têm sido combinados com polímeros termoplásticos na criação de filamentos compósitos para a produção de *scaffolds* com bioatividade, osteocondutividade e propriedades mecânicas vantajosas para a regeneração de defeitos ósseos [18].

Existe uma grande variedade de materiais disponíveis a baixo preço para produção de *scaffolds* por 3DP. Entre os mais utilizados incluem-se polímeros naturais como gelatina, dextrano e amido, polímeros sintéticos biocompatíveis como PLLA e PLGA, e biocerâmicos como HAp e TCP [8,13].

No que diz respeito à bioimpressão 3D, os hidrogéis mais usados para a obtenção de biotintas para aplicações em medicina regenerativa podem ser agrupados em três categorias principais de acordo com a sua fonte e propriedades: i) hidrogéis baseados em polímeros naturais como o alginato de sódio, gelatina, colagénio, fibroína da seda e matriz extracelular descelularizada; ii) hidrogéis de polímeros sintéticos incluindo materiais como PEG, PEGDA, PU e poliacrilamida; e iii) hidrogéis naturais modificados (i.e., funcionalizados) como a GelMA, quitosano modificado e fibroína da seda modificada (ambos usualmente modificados através da adição de grupos funcionais de metacrilato para permitir a sua polimerização por exposição a radiação UV) [15].

4. APLICAÇÕES RECENTES EM ENGENHARIA DE TECIDOS

As diferentes tecnologias de FA descritas nas secções anteriores têm sido amplamente utilizadas em estratégias de engenharia de tecidos não só na produção de *scaffolds*, mas também no fabrico de biorreatores e outros equipamentos usados na estimulação das culturas com o objetivo promover a formação e maturação dos tecidos artificiais [7,8]. Os exemplos de aplicação dos métodos de FA percorrem um vasto leque de tecidos, sendo que entre os mais estudados se inclui o tecido ósseo, cartilaginoso, periodontal, muscular, neural e cardíaco.

Num estudo recente desenvolvido por Wang et al. (2024), os autores utilizaram a técnica de SLA para produzir *scaffolds* do material compósito PLA/beta-tricálcio fosfato (b-TCP) visando aplicações em engenharia do tecido ósseo (Figura 4). A concentração de b-TCP foi otimiza-

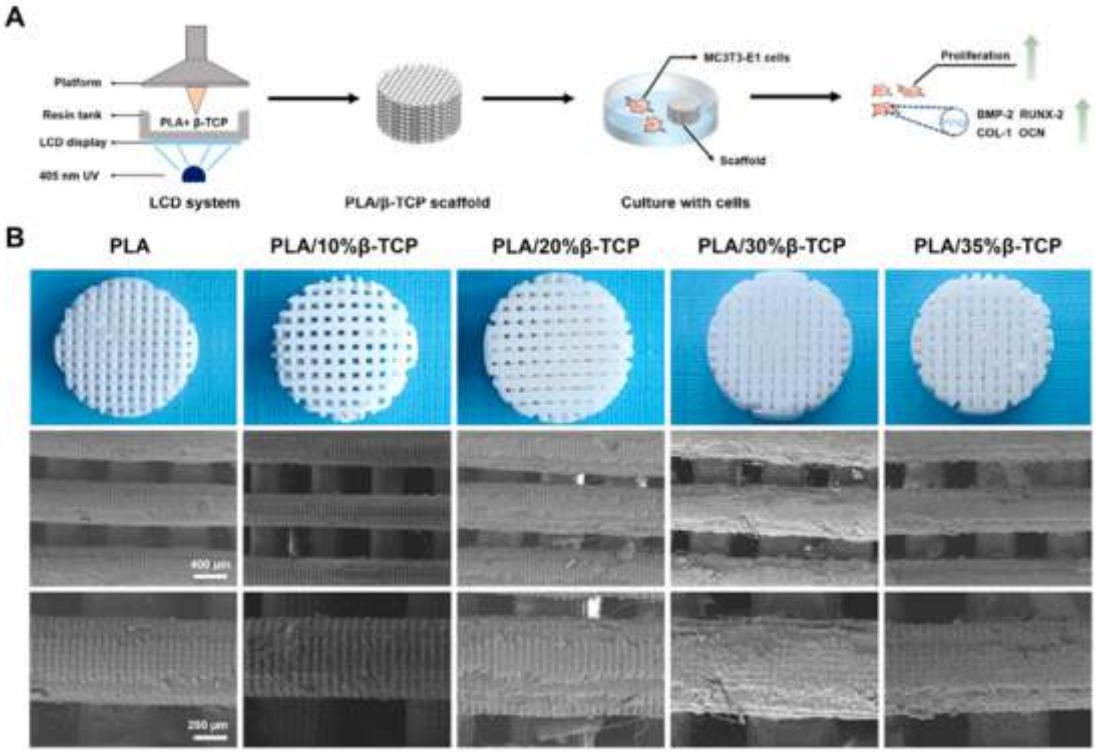


FIGURA 4
Exemplo de aplicação da técnica de SLA para a produção de scaffolds para a engenharia do tecido ósseo. A) Representação esquemática da estratégia para a produção e validação de scaffolds compósitos de PLA/β-TCP usando SLA com fotopolimerização por LCD. B) Fotografias e imagens de microscopia electrónica de varrimento (SEM, em duas ampliações diferentes) dos scaffolds de PLA e compósitos PLA/β-TCP com várias concentrações de β-TCP (adaptado de [19] com a permissão da Frontiers).

da de forma a melhorar as propriedades mecânicas do *scaffold*. Os *scaffolds* PLA/b-TCP foram testados in vitro usando pre-osteoblastos e demonstraram uma excelente capacidade de promover a proliferação e diferenciação osteogénica das células, evidenciando o potencial da estratégia para a produção de implantes bioativos para aplicações em medicina ortopédica [19].

Outro estudo desenvolvido por Gabetti et al. (2022) evidencia a aplicação da técnica de SLA na produção de biorreatores para engenharia de tecidos. Na Figura 5 pode-se observar uma câmara de cultura de um biorreator de perfusão fabricada por SLA usando o material biocompatível Dental SG Resin (Form 3, Formlabs, EUA). O biorreator foi desenhado de forma a que possa conter um *scaffold* com células em cultura, e para que possa estar ligado por tubos a uma bomba de perfusão controlada de forma automática. Este sistema permitiu aos autores estudar o efeito da perfusão na diferenciação osteogénica de células estaminas do mesênquima (MSC) cultivadas no *scaffold* dentro do biorreator, avaliando o potencial deste estímulo biofísico para aplicações em engenharia do tecido ósseo [20].

Muito recentemente, num estudo realizado por Ma et al. (2024), os autores utilizaram a técnica de SLS para fabricar *scaffolds* 3D porosos a partir de uma superliga de titânio-alumínio-vanádio (Ti6Al4V) (Figura 6). Os resultados de caracterização confirmaram o sucesso na produção de *scaffolds* de Ti6Al4V com propriedades mecânicas adequadas. Diferentes revestimentos da superfície foram testados com o objetivo de melhorar a performance biológica e osteocondução dos *scaffolds*. Os tratamentos de superfície estudados, particularmente usando cloridrato de dopamina (DOPA), melhoraram consideravelmente a viabilidade e proliferação de osteoblastos nos *scaffolds* de Ti6Al4V [21].

Num trabalho desenvolvido no nosso grupo de investigação, utilizou-se a técnica de FDM para produzir não só *scaffolds* 3D porosos de PCL, mas também um biorreator em acrilonitrilo butadie- →|

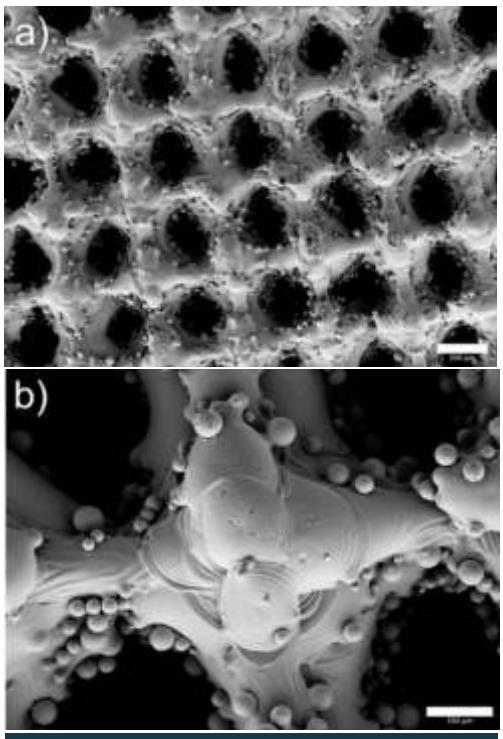


FIGURA 6
Exemplo de aplicação da técnica de SLS para a produção de scaffolds para engenharia de tecido ósseo. Morfologia de superfície dos scaffolds de Ti6Al4V, observada via SEM em duas ampliações diferentes (reproduzido de [21] com a permissão de MDPI).

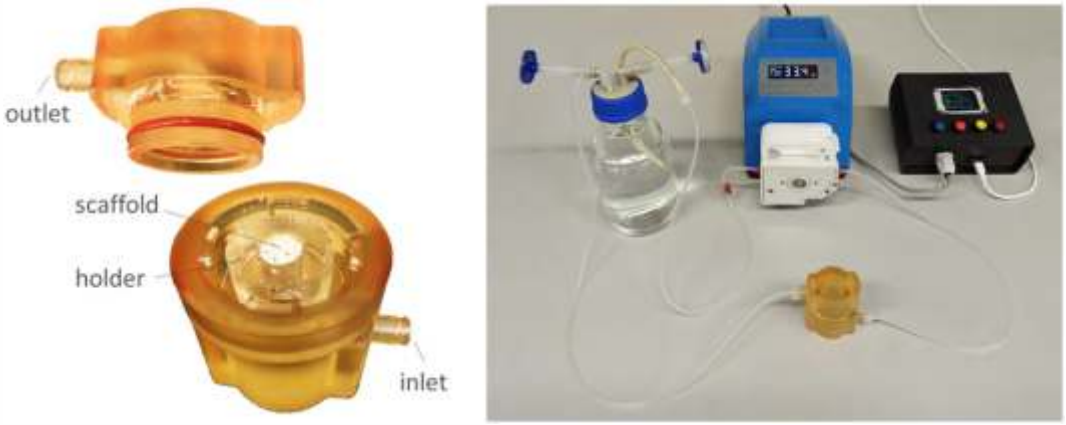


FIGURA 5
Exemplo de aplicação da técnica de SLA para a produção de biorreatores para engenharia de tecidos. Câmara de cultura do biorreator (à esquerda) composta por uma parte de cima equipada com um o-ring e outlet do fluido e uma parte de baixo que contém um holder para o scaffold e a zona de inlet do fluído. À direita podemos observar uma fotografia de todos os componentes do sistema: câmara de cultura, bomba de perfusão e tubagens e unidade de controlo (reproduzido de [20] com a permissão da Nature).

no estireno (ABS) compatível com um sistema de perfusão usando uma bomba peristáltica (ver Figura 7). O biorreator foi con-ceptualizado num software CAD de forma a poder conter seis *scaffolds* (previamente semeados com MSCs) em simultâneo. As construções *scaffold* + células foram então expostas a perfusão dentro do biorreator de forma a estudar o efeito deste estímulo na diferenciação condrogénica das MSCs. Os resultados obtidos demonstraram que os tecidos formados sob o estímulo de perfusão apresentaram um nível mais avançado de diferenciação e de matriz extracelular típica da cartilagem (colagénio tipo II e glicosaminoglicanos) do que aqueles gerados em condições de não perfusão [22].

O estudo levado a cabo por Sanjuan-Alberte et al. (2022) exemplifica o uso de bioimpressão 3D para o desenvolvimento de substitutos biológicos funcionais visando novas terapias para regeneração cardíaca. Como matéria-prima para a criação da biotinta, os autores explora-ram o uso de diferentes matrizes extracelulares descelularizadas (dECM) obtidas a partir de tecidos animais (submucosa do intestino delgado e fígado de porco; tecido ósseo de bovino), que foram posteriormente liofilizadas (Figura 8A). O método de bioimpressão utilizado neste estudo foi a extrusão FRESH (*Freeform Reversible Embedding of Suspended Hydrogels*) (Figura 8B), que consiste na produção de estruturas complexas dentro de uma pasta de gelatina, permitindo a deposição e reticulação de hidrogéis enquanto previne a sua deformação durante o processo de impressão [23]. Com o objetivo de tornar a biotinta condutora à eletricidade de forma a explorar o uso de estimulação elétrica para maturação do tecido cardíaco, os autores adicionaram nanotubos de carbono aos hidrogéis de dECM e caracterizaram os materiais obtidos em termos das sua printabilidade e propriedades reológicas e elétricas. As biotintas condutoras encapsulando cardiomiócitos derivados de células estaminais pluripotentes induzidas foram impressas com sucesso (Figura 8C), demonstrando boa estabilidade e fidelidade de impressão, bem como uma alta viabilidade celular pós-impressão (Figura 8D). A combinação destas biotintas com estimulação eléctrica resultou num maior nível de maturação e batimento cardíaco sincronizado dos cardiomiócitos, em comparação com as condições usando biotintas não condutoras ou não expostas à estimulação elétrica, sugerindo um grande potencial desta estratégia no desenvolvimento de novos métodos terapêuticos para regeneração cardíaca [24].

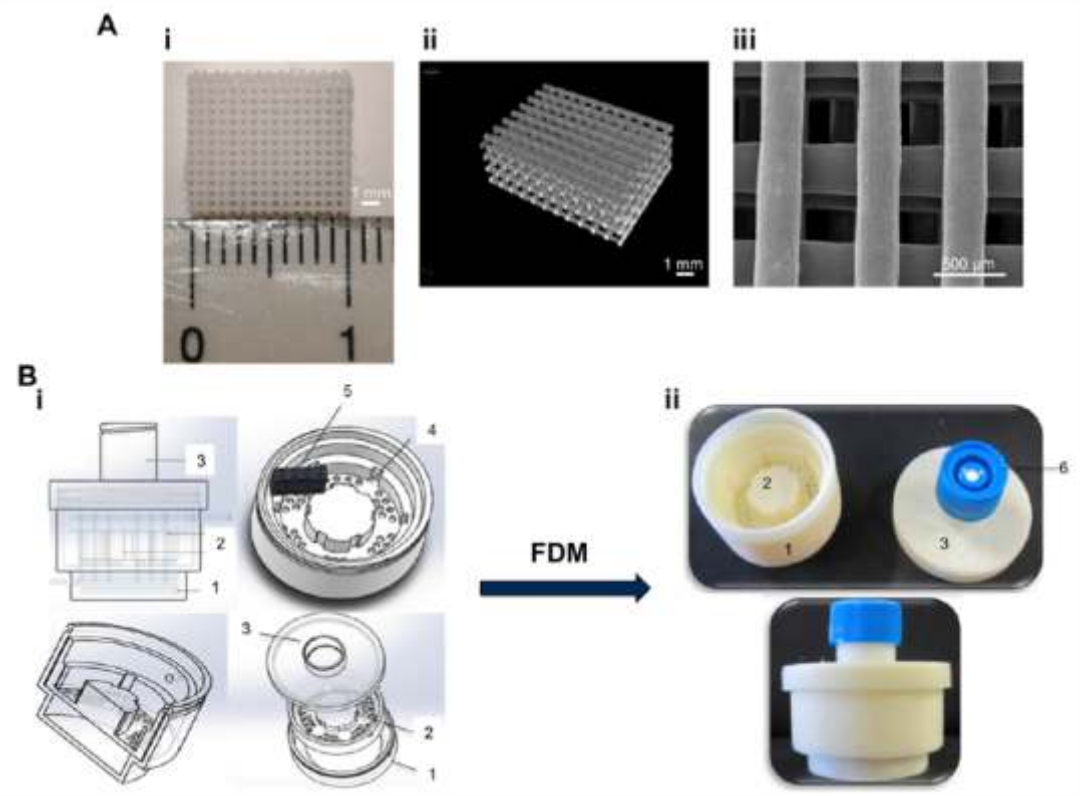


FIGURA 7
Exemplo de aplicação da técnica de FDM para a produção de scaffolds e biorreator para uma estratégia de engenharia de tecidos visando regeneração da cartilagem. A) Scaffold de PCL: i) fotografia; ii) imagem da reconstrução 3D obtida do micro-CT; iii) imagem de SEM. B) Biorreactor fabricado em ABS: i) modelos CAD das diferentes partes constituintes do biorreator e ii) respectivas partes impressas. (reproduzido de [22] com a permissão da WILEY).

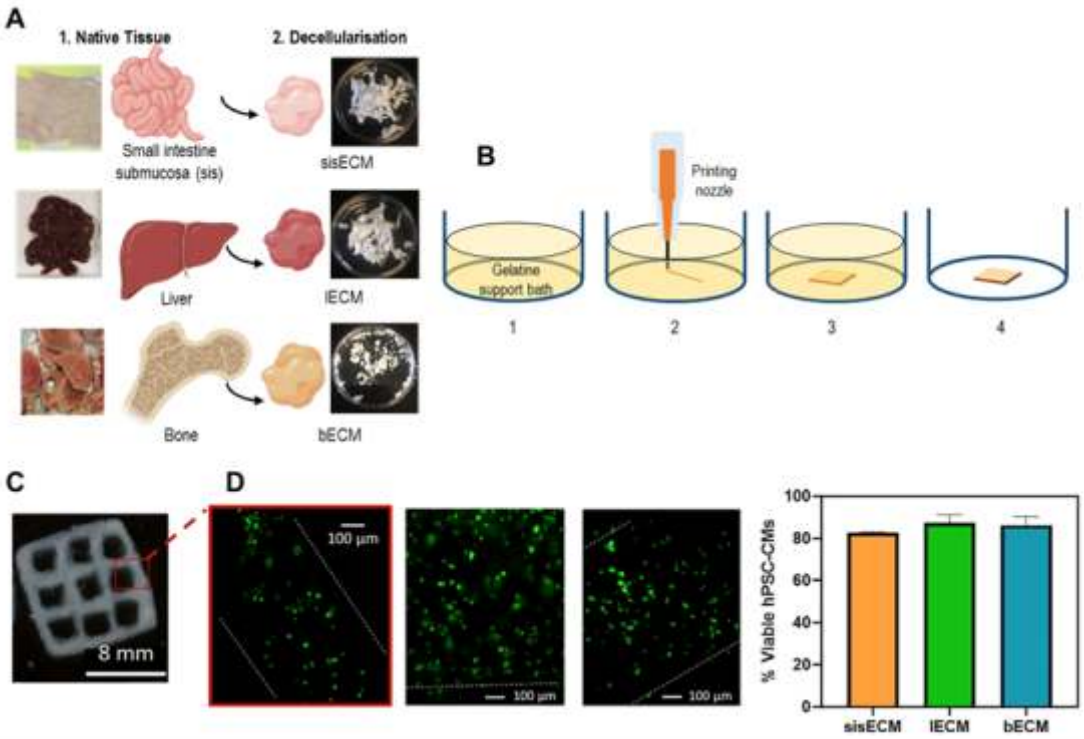


FIGURA 8
Exemplo de aplicação da técnica de bioimpressão 3D numa estratégia de engenharia do tecido cardíaco. A) Tecidos e respectivas matrizes extracelulares descelularizadas (antes e depois do processo de descelularização). B) Representação esquemática do processo de bioimpressão FRESH: 1. Um banho de suporte termo-reversível formado por micropartículas de gelatina é utilizado como substrato; 2. A impressão por extrusão de matriz extracelular descelularizada (dECM) ocorre no interior do banho de gelatina; 3. Gelificação in situ de estruturas dECM impressas à temperatura ambiente; 4. A estrutura é libertada quando a temperatura aumenta para 37 °C. C) Exemplo de um scaffold de bECM impresso. D) Avaliação da viabilidade dos cardiomíocitos impressos por microscopia de fluorescência após marcação com LIVE/DEAD e percentagem de células viáveis depois da bioimpressão usando os diferentes tipos de biotintas de dECM (adaptado de [24] com a permissão da Cell Press).

5. CONCLUSÕES, DESAFIOS E TENDÊNCIAS FUTURAS

Neste artigo, os autores pretenderam apresentar uma visão geral sobre a aplicação das tecnologias de FA na área da engenharia de tecidos e medicina regenerativa, focando-se essencialmente nas técnicas mais utilizadas e nos biomateriais respectivos apropriados para cada técnica. Os exemplos de estudos de investigação representativos das várias técnicas de FA que foram apresentados e discutidos constituem uma excelente prova dos últimos desenvolvimentos nesta área científica.

No entanto, apesar dos grandes avanços levados a cabo pela comunidade científica nas últimas décadas, a translação e aplicação clínica de estratégias de engenharia de tecidos usando métodos de FA ainda se encontra bastante limitada. Um dos grandes desafios na área da engenharia de tecidos é a produção de construções de tecidos artificiais que possuam uma vasculatura apropriada. A regeneração funcional de tecidos hierarquizados com uma estrutura gradiente complexa como é o caso dos tecidos osteocondrais representa outro grande desafio na área de medicina ortopédica. Novas terapias efetivas para a regeneração osteocondral teriam um grande impacto na nossa sociedade, uma vez que o corrente crescimento da prevalência de doenças como a osteoartrite e osteoporose resultante do envelhecimento da população, coloca uma grande pressão sob os nossos sistemas de saúde. Melhorias no design dos *scaffolds*, por exemplo através do uso de modelos in silico, sistemas de inteligência artificial e *machine learning* na procura de soluções otimizadas bem como a integração de várias técnicas de FA ou de técnicas de FA com outros métodos de produção de *scaffolds* (por exemplo, electrospinning) têm um grande potencial para a obtenção de estruturas hierárquicas multiescala capazes de mimetizar melhor as estruturas complexas dos tecidos nativos.

Outra tendência futura que poderá influenciar o avanço das tecnologias de FA na área da biomédica e medicina regenerativa, é o aparecimento e consequente utilização mais generalizada de novos materiais inteligentes que respondem a estímulos externos (por exemplo, eléctrico, magnético, pH, temperatura, concentração de glucose, entre outros). Estes materiais vão permitir a estabilização do conceito de impressão 4D, em que a quarta dimensão corresponde a

um estímulo externo que faz com que o *scaffold* adapte a sua estrutura. *Scaffolds* ou biotintas produzidos usando estes materiais inteligentes poderão ser utilizados para desencadear respostas específicas ao nível celular, promovendo uma regeneração mais gradual e efetiva dos tecidos.

A integração de estratégias de montagem modelar de tecidos (*modular tissue assembly*) em tecnologias de FA poderá resultar na produção de tecidos com um maior nível de organização através de uma melhor recapitulação dos eventos ocorridos durante o desenvolvimento embrionário (por exemplo: ossificação endocondral e organogénese). Agregados celulares, microtecidos ou microgels com células encapsuladas podem ser produzidos em formas pré-estabelecidas através do uso de poços de cultu-ra com micro-moldes específicos, e depois utili-zados como blocos de construção (*buiding blocks*) integrados nos processos de FA (colocados em *scaffolds* ou como parte de uma biotinta para bioimpressão) para a biofabricação de estruturas multicelulares com maior complexidade e organização.

Outra tendência futura que poderá contribuir para uma mais rápida translação clínica das técnicas de FA, é o desenvolvimento de tecnologias de biofabricação *in situ*. Estas tecnologias deverão conter um sistema adaptativo que possa definir um modelo 3D do defeito a regenerar e um caminho para impressão com base em dados de imagem (tomografia computorizada ou ressonância magnética) obtidos em tempo real. Apesar de ainda se encontrar em fase desenvolvimento, um sistema de biofabricação *in situ* têm um grande potencial clínico, principalmente para casos que requerem um tratamento pouco invasivo e/ou estratégias de medicina regenerativa personalizadas (implantes customizados).

Assim, a integração de sistemas de FA em ambiente hospitalar/clínico bem como o treino efetivo dos profissionais de saúde no uso destas tecnologias deve ser feita de uma forma abrangente num futuro próximo, de forma a potenciar todas as futuras vantagens que os constantes desenvolvimentos nos métodos de FA vão introduzir na prática clínica. A melhoria das tecnologias existentes bem como o desenvolvimento de novos métodos de FA e estratégias de engenharia de tecidos para o fabrico de tecidos artificiais deverá ser feita combinando esforços de equipas multidisciplinares e em constante comunicação com as agências reguladoras (FDA ou EMA), de forma a garantir uma translação eficiente dos resultados da investigação em benefícios clínicos para a sociedade.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT/MCTES) através dos projetos de investigação InSilico4OCReg (REF: PTDC/EME-SIS/0838/2021) e OptiBioScaffold (REF: PTDC/EME-SIS/4446/2020) e também através de fundos atribuídos às instituições iBB (UIDB/04565/2020 e UIDP/04565/2020) e ao Laboratório Associado i4HB (LA/P/0140/2020).

REFERÊNCIAS

[1] R. Langer, J.P. Vacanti, Science, 260:920-926, 1993.

[2] A.G. Abdelaziz, H. Nageh, S.M. Abdo, M.S. Abdalla, A.A. Amer, A. Abdal-hay, A. Barhoum, Bioengineering, 10:204, 2023.

[3] C.M. Murphy, F.J. O'Brien, D.G. Little, A. Schindeler, European Cells and Materials, 26:120-132, 2013.

[4] F.P.W. Melchels, M.A.N. Domingos, T.J. Klein, J. Malda, P.J. Bartolo, D.W. Hutmacher, Progress in Polymer Science, 37: 1079-1104, 2012.

[5] M.I.E. Molina, K.G. Malollari, K. Komvopoulos, Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, 9: 617141, 2021.

[6] C.J. Culbreath, M. Scott Taylor, S.D. McCullen, O. Thompson Mefford, Biomedical Materials & Devices, (2024): 1-22, 2024.

[7] G.M. Di Gravina, G. Loi, F. Auricchio, M. Conti, Biophysics Reviews, 4: 031302, 2023.

[8] C. Mota, D. Puppi, F. Chiellini, E. Chiellini, Journal of Tissue Engineering and Regenerative Medicine, 9: 174-190, 2015.

[9] A. Gleadall, D. Visscher, J. Yang, D. Thomas, J. Segal, Burns & Trauma, 6: 19, 2018.

[10] E.M. Maines, M.K. Porwal, C.J. Ellison, T.M. Reineke, Green Chemistry, 23: 6863, 2021.

[11] P. Kumar, Shamim, M. Muztaba, T. Ali, J. Bala, H.S. Sidhu, A. Bhatia, Annals of Biomedical Engineering, 52: 1184-1194, 2024.

[12] A. Mazzoli, Medical & Biological Engineering & Computing, 51: 245-256, 2013.

[13] S.F.S. Shirazi, S. Gharehkhani, M. Mehrali, H. Yarmand, H.S.C. Metselaar, N.A. Kadri, N.A.A. Osman, Science and Technology of Advanced Materials, 16: 033502, 2015.

[14] Z. Xie, M. Gao, A.O. Lobo, T.J. Webster, Polymers, 12: 1717, 2020.

[15] W. Fang, M. Wang, L. Wang, W. Li, M. Liu, Y. Jin, Y. Wang, R. Yang, Y. Wang, K. Zhang, Q. Fu, International Journal of Bioprinting, 9: 759, 2023.

[16] J.M. Latimer, S. Maekawa, Y. Yao, D.T. Wu, M. Chen, W.V. Giannobile, Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, 9: 704048, 2021.

[17] M.J. Mirzaali, V. Moosabeiki, S.M. Rajaai, J. Zhou, A.A. Zadpoor, Materials, 15: 5457, 2022.

[18] N. Rezania, M. Asadi-Eydivand, N. Abolfathi, S. Bonakdar, M. Mehrjoo, M. Solati-Hashjiin, Journal of Materials Science: Materials in Medicine, 33: 31, 2022.

[19] B. Wang, X. Ye, G. Chen, Y. Zhang, Z. Zeng, C. Liu, Z. Tan, X. Jie, Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, 12: 1273541, 2024.

[20] S. Gabetti, B. Masante, A. Cochis, G. Putame, A. Sanginario, I. Armando, E. Fiume, A.C. Scalia, F. Daou, F. Baino, S. Salati, U. Morbiducci, L. Rimondini, C. Bignardi, D. Massai, Scientific Reports, 12: 13859, 2022.

[21] C. Ma, N.R. de Barros, T. Zheng, A. Gomez, M. Doyle, J. Zhu, H.S. Nanda, X. Li, A. Khademhosseini, B. Li, Biomimetics, 9: 423, 2024.

[22] J.C. Silva, C.S. Moura, G. Borrecho, A.P. Alves de Matos, C.L. da Silva, J.M.S. Cabral, P.J. Bartolo, R.J. Linhardt, F.C. Ferreira, Biotechnology Journal, 15: 1900078, 2020.

[23] T.J. Hilton, Q. Jallerat, R.N. Palchesko, J.H. Park, M.S. Grodzicki, H.-J. Shue, M.H. Ramadan, A.R. Hudson, A.W. Feinberg,. Science Advances, 1: e1500758, 2015.

[24] P. Sanjuan-Alberte, C. Whitehead, J.N. Jones, J.C. Silva, N. Carter, S. Kellaway, R.J.M. Hague, J.M.S. Cabral, F.C. Ferreira, L.J. White, F.J. Rawson, iScience, 25: 7, 2022.

CONFIAR NA MANUFATURA ADITIVA E NO PAPEL NA NORMALIZAÇÃO

MARTINHO OLIVEIRA
PROFESSOR E INVESTIGADOR EM MANUFATURA ADITIVA
PRESIDENTE DA COMISSÃO TÉCNICA NACIONAL DE NORMALIZAÇÃO CT220 – MANUFATURA ADITIVA
DIRETOR DA ESAN – UNIVERSIDADE DE AVEIRO

A Manufatura Aditiva, frequentemente designada por impressão 3D, resulta de uma evolução tecnológica dos sistemas de prototipagem rápida, o primeiro dos quais apareceu na década de 1980, com uma denominação pouco amigável – estereolitografia – e custos pouco convidativos. As peças então produzidas serviam para validação de forma e os seus desempenhos mecânicos eram muito residuais. Embora lenta, a evolução dos processos continuou e surgiram novas soluções no mercado como a sinterização seletiva a laser (SLS), a fabricação por filamento fundido (FFF) e o jato de ligante, esta última também conhecida por impressão 3D, designação que popularizou e democratizou estes sistemas.

Os processos aditivos, em oposição a processos subtrativos e a processos formativos, oferecem complexidade geométrica, customização e personalização de produto, redução dos tempos de produção, minimizando a produção de resíduos. Tais vantagens proporcionam a produção de pequenos, mas numerosos, lotes - massificação do produto (customização/personalização) e não da produção e, naturalmente, a produção de protótipos. Hoje, temos capacidade de transformar cerâmicos, polímeros, metais e compósitos por técnicas aditivas; contudo, os diferentes graus de maturidade das técnicas refletem-se na qualidade e no desempenho dos produtos. Para lá de limitações ao nível do espectro das matérias-primas transformáveis e da dimensão dos objetos, os produtos obtidos por Manufatura Aditiva apresentam anisotropia, propriedades mecânicas e graus de acabamento superficial abaixo do desejável.

Salvaguardando o desenvolvimento no seio das entidades não empresariais do sistema de investigação e inovação (ENESII), em Portugal, a adoção da Manufatura Aditiva está a ser lenta, mas na direção desejável. Os sistemas aditivos de transformação de metal estão a surgir na indústria, com destaque para os sistemas de fusão em cama de pó e de deposição com energia direcionada, com aplicações na indústria de moldes e medicina personalizada. A transformação industrial aditiva de polímeros e cerâmicos segue a um ritmo mais lento, reflexo do estado da tecnologia atual - na realidade muitos dos sistemas aditivos poliméricos, existentes nas empresas nacionais, destinam-se a apoiar o processo de desenvolvimento de produto (produção de protótipos/validação geométrica), com destaque para os sistemas de extrusão de material e fotopolimerização em cuba.

Temos condições para desenvolver e inovar em Manufatura Aditiva e as empresas portuguesas têm a oportunidade de se posicionar na vanguarda desta tecnologia! A colaboração entre ENESII e a indústria é, e será, fundamental para alcançar esse objetivo, promovendo a formação de ecossistema de inovação robusto e dinâmico, adaptado às novas possibilidades que esta tecnologia oferece.

O futuro da Manufatura Aditiva continua promissor e é já parte integral da cadeia de produção global. A evolução dos materiais e das



tecnologias aditivas e a integração de inteligência artificial e machine learning nos processos aditivos de produção, no seu conjunto, permitirá a criação de novos produtos ainda mais complexos, funcionais, leves e resistentes, e com melhores acabamentos superficiais.

Para uma maior fiabilidade da Manufatura Aditiva é necessário que o sistema de normalização funcione proporcionando padrões que assegurem a qualidade, a segurança e eficiência destes novos processos. No panorama internacional e em termos de normas para testes de materiais, produtos, sistemas e serviços, as organizações internacionais International Organization for Standardization (ISO) e American Society for Testing and Materials (ASTM) têm vindo a lançar um conjunto de normas técnicas, de elevada relevância, para Manufatura Aditiva.

Recentemente (15/4/2024), no âmbito dos trabalhos da Comissão Técnica CT220 - Manufatura Aditiva, coordenada pelo Organismo de Normalização Setorial, CATIM - Centro de Apoio Tecnológico à Indústria Metalomecânica, foi oficialmente lançada a Norma NP ISO ASTM 52900:2024 - Manufatura Aditiva - Princípios gerais - Fundamentos e terminologia.

O objetivo desta norma é uniformizar os termos e definições usados em Manufatura Aditiva, através da definição de termos e da organização da terminologia por áreas específicas de aplicação. Espera-se que a Norma contribua para facilitar a comunicação no espaço da língua portuguesa e promova uma ampla e consistente divulgação das tecnologias de Manufatura Aditiva em diversos setores.

A Comissão CT220 é coordenada pelo Organismo de Normalização Setorial, CATIM - Centro de Apoio Tecnológico à Indústria Metalomecânica e reúne um total de 45 membros provenientes de 26 entidades do sistema empresarial e do sistema nacional de ensino superior.

ESTUDO COMPARATIVO ENTRE TECNOLOGIAS DE IMPRESSÃO 3D DESKTOP

Carlos Relvas[1] e Ruben Martins[2]

1 Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro e TEMA, Centro de Tecnologia Mecânica e Automação da UA.

2 Mestre em Engenharia Mecânica, Universidade de Aveiro.

O fabrico aditivo, também designado por impressão 3D, é um tema cada vez mais frequente, tanto na área industrial como na área académica pelo seu impacto no desenvolvimento e fabrico de novos produtos. O trabalho aqui apresentado foca-se no estudo comparativo entre duas das tecnologias mais utilizadas na impressão 3D desktop, FDM/FFF (Fused Deposition Modeling/ Fused Filament Fabrication) e DLP (Digital Light Processing). Para isso, o estudo foi dividido em três partes: primeiro foi efetuada uma análise comparativa das tecnologias, depois foi efetuada a caraterização mecânica e por fim o controlo geométrico e dimensional dos componentes impressos. Na primeira parte, foram comparados diversos parâmetros de ambas as tecnologias, de forma a fornecer uma visão detalhada das diferenças mais caraterísticas e mais importantes entre as duas tecnologias. Na segunda parte, realizaram-se ensaios de flexão de 3 pontos, em provetes impressos por estas tecnologias, sendo que os ensaios de flexão demonstraram que os provetes impressos pelo método de DLP revelaram um comportamento típico de fratura frágil, enquanto os provetes impressos pelo método de FDM/FFF revelaram um comportamento de natureza dúctil, algo expectável devido à natureza dos materiais. Na análise da rigidez, concluiu-se que o processo de DLP apresentou maior rigidez que FDM/FFF. Em relação à terceira e última parte do estudo os resultados geométricos indicaram que a tecnologia de FDM/FFF obteve melhores resultados na planeza, perpendicularidade, angularidade e circularidade, enquanto DLP foi melhor na cilindricidade. Por fim, na análise dimensional, o processo de FDM/FFF apresentou na globalidade uma qualidade IT9 enquanto o processo de DLP uma qualidade IT13.

A IMPRESSÃO 3D: UMA NOVA FORMA DE PENSAR E DE PRODUZIR.

O fabrico aditivo (FA) oferece uma enorme variedade de benefícios e apesar dos avanços significativos nos últimos anos, porém ainda permanecem diversos desafios e limitações, associadas tanto a equipamentos e como materiais. Entre os múltiplos benefícios, nomeadamente por comparação com os processos convencionais, podemos destacar: o fabrico e produção de peças mais leves (Figura 1) , utilizando menos material, recorrendo a estru-turas internas ocas ou alveolares (*lattice*) e superfícies envolventes mais ou menos densas [1,2]; capacidade de fabricar peças com geometrias complexas e orgânicas (Figura 2), com a mesma simplicidade com que se produz peças de geometrias regulares, permitindo uma maior liberdade projetual e melhorar a funcionalidade de um componente incorporando na solução elementos geométricos dificilmente obtidos através de outros meios ou processos de fabrico [2,3]; permite fazer a consolidação de várias peças num único componente (Figura 3), libertando o projeto dos constrangimentos induzidos pela maioria dos processos de fabrico convencionais e reduzindo os interfaces e a utilização de elementos de ligação e consequentemente reduzindo o número de montagens [4], para além de apresentar-se como um processo tecnológico automático e de baixa vigilância, permitindo transformar os ditos setores produtivos ao ponto de fazer surgir uma nova designação, que reforça a intensidade do processo as *farm manufacturing* [1].

Em resumo, pode-se dizer que o FA, trouxe consigo, uma nova forma de pensar e projetar e, uma nova forma de fabricar e produzir.

Referimo-nos efetivamente à forma de lidar com esta mudança, sendo que este poderá ser o

enfoque e desafio que a academia, as empresas e as pessoas individualmente poderão enfrentar nos próximos anos.



FIGURA 1
Peças mais leves, com menos material utilizado



FIGURA 2
Utilização de geometrias orgânicas e funcionalidade melhorada



FIGURA 3
Consolidação de componentes

Considerando que a primeira impressora 3D comercial surgiu em 1984, (Figura 4), à época designada por prototipagem rápida, regista-se nos últimos anos um aumento repentino no desenvolvimento e implementação de diversas soluções tecnológicas nesta área, onde se destaca a disponibilização de soluções de impressoras 3D de baixo custo, vulgarmente designadas por desktop, rapidamente adotadas pelos utilizadores individuais e domésticos. Esta realidade permite-nos afirmar que estamos perante um processo de fabrico verdadeiramente democrático, acessível a uma grande fatia de utilizadores domésticos em simultâneo com a transição tecnológica que ocorre internamente nas empresas.

ESTUDO COMPARATIVO ENTRE AS TECNOLOGIAS DE FFF/FDM E DLP

O estudo visou contribuir para a identificação de forma concreta e objetiva, das diferenças mais significativas entre as tecnologias em questão FFF/FDM versus DLP, comparando materiais, custos, aplicações dos modelos obtidos entre outros. Justificando-se o enfoque do estudo nestas tecnologias, pois considera-se estas são provavelmente devido à acessibilidade de custos as duas tecnologias desktop mais vulgarmente utilizadas por empresas em fase inicial de adoção do FA e pelos utilizadores individuais domésticos, hobistas e curiosos.
Deste modo o trabalho experimental foi constituído por:

1) Análise do tempo de configuração das impressoras
2) Análise do tempo de impressão dos modelos de estudo
3) Estudo e definição dos parâmetros de impressão dos modelos de estudo
4) Caraterização mecânica dos provetes obtidos em cada uma das tecnologias e utilizando os materiais mais frequentes
5) Análise geométrica e dimensional de um componente obtidos nas duas tecnologias

A TECNOLOGIA DE FFF/FDM

O processo FFF/FDM utiliza um filamento de material que alimenta uma cabeça de extrusão. O material é aquecido no interior da cabeça de extrusão e é expelido através de um bico de extrusão que o deposita em locais pré-determinados formando uma camada. O material depositado arrefece e solidifica, enquanto a cabeça ou a plataforma de construção se move verticalmente, para permitir a deposição de uma nova camada sobre a anterior (Figura 5).

Com esta tecnologia é possível utilizar diferentes filamentos termoplásticos, como a acrilonitrila



FIGURA 4
Cronograma de aparecimento das tecnologias de FA, adaptado de [1]

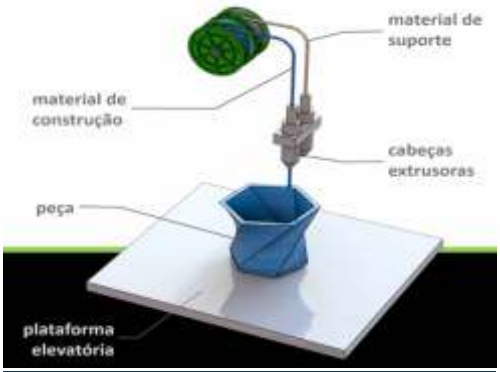


FIGURA 5
Processo de FDM [5]

butadieno estireno (ABS), ácido polilático (PLA), policarbonato (PC), poliestireno (PS), poliamida (PA) e o polietileno tereftalato glicol (PETG) entre outros. Todos estes materiais estão disponíveis em diversas cores [6]. O PLA é talvez o material mais frequentemente utilizado para o fabrico de modelos e protótipos, sendo um material de fácil processamento e os modelos apresentam um aspeto brilhante, boa precisão dimensional e bom acabamento superficial. Os materiais são fornecidos em rolos de filamentos, em tamanhos normalizados (1,75 ou 2,85 mm). O preço dos materiais neste processo é de aproximadamente de 18 $/kg para filamento.

A TECNOLOGIA DE DLP

Este processo foi desenvolvido como um avanço significativo em relação ao SLA. O DLP (Figura 6) aproveita o poder de um projetor digital de luz, que faz uma rápida projeção de luz UV, para curar toda uma camada de resina líquida fotossensível de uma só vez, Figura 6. Neste processo é possível curar uma seção transversal inteira quase instantaneamente, permitindo tempos mais rápidos entre as camadas [7], diferindo tecnologia de FFF/FDM, onde cada camada é construída por varrimento ao longo da trajetória definida para a cabeça extrusora. No DLP cada projeção em toda a área leva exatamente a mesma quantidade de tempo, independentemente de quantas partes existem na área de construção. Como resultado, o tempo total de impressão depende apenas da altura da peça e não da sua dimensão ou quantidade de peças em construção, pois a resina é curada ao mesmo tempo. A altura de peça determina quantas camadas são necessárias para concluir o trabalho. A tecnologia de DLP utiliza resinas fotopoliméricas, que nalguns casos podem ser similares a ABS, PP ou Nylon [1].

Hoje, esta tecnologia de impressão é bastante acessível, precisa e de elevada velocidade, sendo utilizada desde a prototipagem até à produção de peças de uso final. Atualmente esta tecnologia é bastante utilizada no fabrico de modelos na área odontológica "Invisalign - invisible teeth aligners", aparelhos auditivos e joalharia [7]. Por outro lado, o baixo volume de construção é uma desvantagem importante.

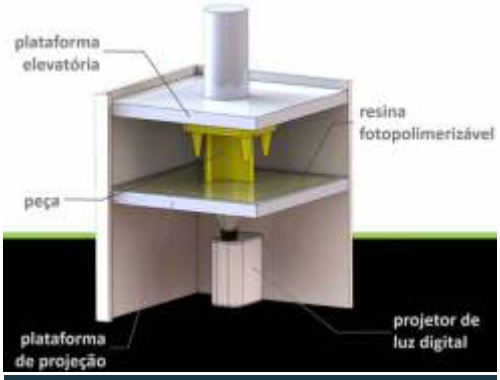


FIGURA 6
Processo de DLP [5]

DESCRIÇÃO DOS EQUIPAMENTOS DE IMPRESSÃO 3D

Para a obtenção do modelo de estudo através do processo de FDM/FFF foi utilizado o equipamento de impressão Ultimaker S5 (Figura7). Este equipamento de impressão é versátil e fácil de utilizar permitindo impressões utilizando dois materiais diferentes. Esta máquina apresenta o maior volume de construção, relativamente às impressoras da marca da mesma categoria, o que permite colocar mais objetos de forma eficiente na área de construção.

Para o processo de DLP foi utilizado o equipamento de impressão ANYCUBIC Photon Mono, (Figura 8a). Este apresenta um LCD monocromático 2k de 6 polegadas, conduzindo a um tempo de exposição inferior a 1 segundo. Isto permite um menor uso de energia, enquanto a impressora imprime mais rápido. Apresenta uma fonte de luz que permite uma exposição mais uniforme e com maior eficiência e com maior dissipação de energia. Apresenta um tanque de fácil remoção/colocação, protegido por uma tampa que permite o bloqueio de raios UV. Após a obtenção da peça na impressora 3D esta é transferida para um equipamento capaz de a lavar e curar. O equipamento utilizado foi o ANYCUBIC Wash & Cure Machine 2.0, (Figura 8b). Este equipamento permite configurações ao utilizador, como por exemplo ajustar o tempo entre 1 e 60 min. Possui uma distribuição uniforme da luz UV, assim como, uma plataforma rotativa de 360°.

REALIZAÇÃO DOS MODELOS DE ESTUDO

O estudo comparativo foi dividido em duas partes: para a caracterização mecânica, foram realizados ensaios de flexão destrutivos de 3

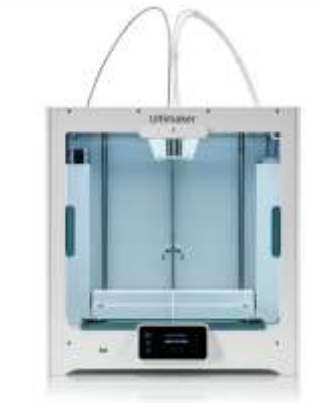


FIGURA 7
Impressora 3D Ultimaker S5

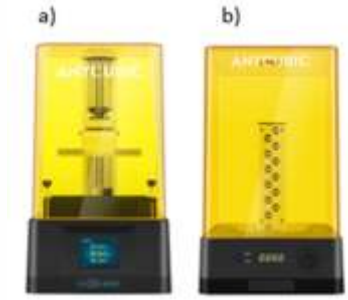


FIGURA 8
a) ANYCUBIC Photon Mono
b) ANYCUBIC Wash & Cure Machine 2.0

pontos de acordo com a norma ASTM D790, para estudar a rigidez dos provetes, e determinar as propriedades de flexão do material. Para isso foram obtidos provetes de 127 mm x 12,7 mm x 3,2 mm. O material do modelo impresso através do processo de FDM/FFF foi o PLA (poliácido láctico) da Ultimaker. Este é um dos materiais termoplásticos mais populares para impressoras FDM/FFF. É caracterizado pela sua facilidade de utilização e reduzido custo. Este material quando derretido, torna-se muito mais fluído do que a maioria dos outros plásticos e conjuntamente com um bom processo de arrefecimento, permite obter detalhes com grande qualidade. Por outro este material apresenta baixa resistência ao calor, sendo inadequado para altas temperaturas, e pode ficar quebradiço quando exposto a alta humidade. Relativamente ao modelo impresso através do processo de DLP, foram utilizadas duas cores distintas de resina polimérica standard, transparente (Figura9a) e cinzenta (Figura 9b). Esta resina aumenta tanto a eficiência da impressão e a sua velocidade como a formação da fonte de luz do projetor de vídeo da máquina de impressão, conduzindo a uma redução do tempo de cura. A resina possibilita uma solidificação de alta velocidade, garantindo desta forma, a inexistência de contração excessiva da peça e a sua resistência.

Para o controlo GD&T foi definido um modelo de estudo, conforme Figura 10. Para se obter os desvios dimensionais e geométricos registados nos modelos obtidos nas duas tecnologias. Sendo o modelo de base retangular com dimensões envolventes de 70x70x38mm, e apresentando elementos geométricos de diferentes tamanhos, interiores e exteriores, constituídos por elementos cilíndricos, furos, uma caixa/ilha com os 4 cantos redondos e duas superfícies inclinadas com diferente inclinação e três superfícies ortogonais utilizadas como planos de referência.



FIGURA 9
a) Resina polimérica transparente;
b) Resina polimérica cinzenta

PARÂMETROS DE IMPRESSÃO DOS MODELOS EM ESTUDO

Os parâmetros de impressão utilizados para a obtenção dos modelos podem ser observados na Tabela 1.

TEMPO DE IMPRESSÃO DOS MODELOS DE ESTUDO

A Tabela 2 fornece uma visão geral dos tempos de impressão, bem como a variação entre os diferentes modelos e configurações utilizadas.

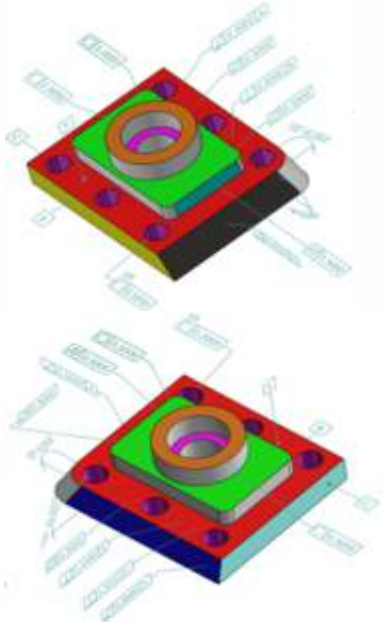
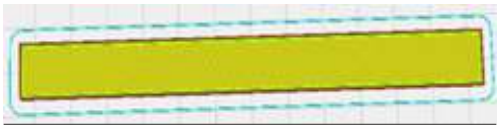


FIGURA 10
Representação da peça modelo

No caso da tecnologia de DLP o tempo de lavagem definido foi de 3 min, enquanto o tempo de cura foi de 6 min para cada um dos dois lados da peça.

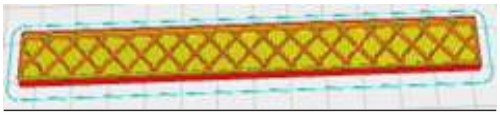
TABELA 1
Parâmetros de impressão dos modelos de estudo

Provete A (completamente maciço)

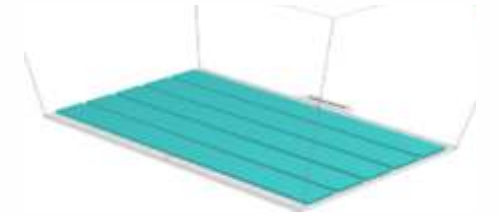


	Parâmetro	*Valor*
Caracterização mecânica FFF/FDM	Layer Height	**0,1 mm**
	Wall Line Coun	**2**
	Top Layers	**10**
	Bottom Layers	**10**
	Infill Density	**100%**
	Infill Pattern	**Triangles**
	Print Speed	**70 mm/s**
	Build Plate Adhesion	**Skirt**

Provete Padrão (alveolar)

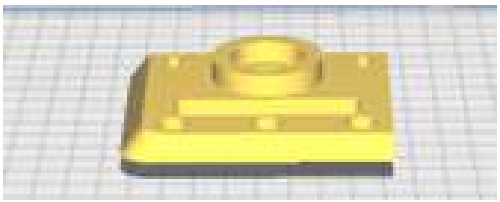


	Parâmetro	*Valor*
Caracterização mecânica FFF/FDM	Layer Height	**0,1 mm**
	Inicial Layer Height	**0,2mm**
	Wall Line Count	**2**
	Top Layers	**4**
	Bottom Layers	**4**
	Infill Density	**15%**
	Infill Pattern	**Grid**
	Print Speed	**70 mm/s**
	Build Plate adhesion type	**Skirt**
	Printing Temperature	**200ºC**



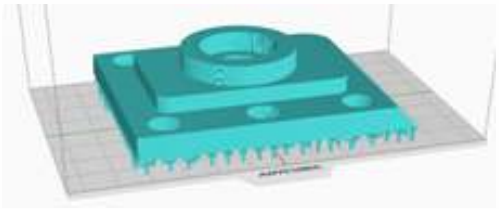
Resina Transparente **Resina Cinzenta**

	Parâmetro	*Valor*
Caracterização mecânica DLP	Espessura da camada	**0,050 mm**
	Tempo de exposição	**2s**
	Nº camadas inferiores	**6**
	Tempo exposição camada inferior	**40s**
	Off time	**0,5s**



FFF/FDM

	Parâmetro	*Valor*
Controlo GD&T Modelo Físico	Ø Bico extrusão	**0,4 mm**
	Espessura da camada	**0,1 mm**
	Largura	**0,4 mm**
	Wall line count	**4**
	Top Layers	**9**
	Infill Density	**20%**
	Temperatura da cama	**200º**
	Temperatura do extrusor	**60º**



DLP

	Parâmetro	*Valor*
Controlo GD&T Modelo Físico	Espessura da camada	**0,050 mm**
	Tempo de exposição	**8s**
	Nº camadas inferiores	**6**
	Tempo exposição camada inferior	**60s**
	Off time	**0,5s**
	Tipo de suporte	**Light**
	Distance in model	**0**
	Z lift height	**0**
	Top widht	**0,1**

CARATERIZAÇÃO MECÂNICA DOS PROVETES OBTIDOS EM CADA UMA DAS TECNOLOGIAS E UTILIZANDO OS MATERIAIS MAIS FREQUENTES

Na análise dos limites de resistência dos provetes de resina, Tabela 3, é evidente que os resultados revelam algumas diferenças entre os dois tipos de resina testados, assim como, nos provetes de PLA.

TABEL 2
Tempos de impressão dos modelos estudados

Tecnologia	*Modelo de estudo*	*Tempo de impressão*	*Lavagem*	*Cura*	*Total*
FDM	Provete	**5h50min**	**----**	**----**	**5h50min**
	Provete Padrão	**3h15min**	**----**	**----**	**3h15min**
	Peça GD&T	**8h12min**	**----**	**----**	**8h12min**
DLP	DLPProvete A - Resina transparente	**13min11s**	**3min**	**6+6min**	**28min11s**
	Provete A - Resina cinzenta	**13min11s**	**3min**	**6+6min**	**28min11s**
	Peça GD&T	**2h46min**	**3min**	**6+6min**	**3h1min**

Observa-se que o valor médio do limite de resistência é muito maior para os provetes de resina transparente quando comparados com os de resina cinzenta. Isto pode ser explicado pela variação em termos químicos (eventual presença de aditivos), o que influencia diretamente as propriedades mecânicas. O processo de cura também pode explicar isto, apesar de, os tempos de cura terem sido iguais para todos os provetes. Mesmo com semelhante exposição à luz UV, a microestrutura interna da peça pode variar dependendo da formulação da resina. Essas diferenças microestruturais podem afetar as propriedades mecânicas da peça final. Isso significa que a resina transparente utilizada no processo apresenta uma composição química que resulta numa cura mais eficaz. Também se observa que, os provetes de resina cinzenta apresentaram resultados mais discrepantes. Isso é evidenciado tanto pela variabilidade dos valores do limite de resistência como pelas diferenças nas deformações de rutura.

Ao analisar os limites de resistência dos provetes de PLA, surge uma grande diferença entre os resultados médios obtidos para os provetes do tipo A (100% *infill*) e os provetes padrão (15% *infill*). Essa disparidade revela a influência da densidade do preenchimento na resistência final dos provetes de PLA. Os provetes do tipo A, caraterizados por uma estrutura maciça, demonstraram uma extraordinária capacidade de resistência, uma vez que nenhum deles chegou a fraturar completamente durante o ensaio de flexão de 3 pontos. Por outro lado, os provetes do tipo padrão, devido ao preenchimento não contínuo, exibiram uma resistência consideravelmente menor, o que resultou na sua fratura completa. Analisando a deformação de rutura, conclui-se que os resultados demonstram claramente a influência do valor da densidade do infill na deformação de rutura dos provetes.

ANÁLISE GEOMÉTRICA E DIMENSIONAL DE UM COMPONENTE OBTIDO NAS DUAS TECNOLOGIAS

Em termos da análise geométrica do modelo GD&T, foram considerados os aspetos de planeza, perpendicularidade, angularidade, circularidade e cilindricidade devido à tipologia do modelo impresso. Isto permitiu caraterizar especificamente o modelo e estudar quais são as capacidades dos processos utilizados de acordo com um sistema de toleranciamento que já é conhecido e amplamente utilizado em diversos estudos de GD&T. Os valores experimentais obtidos para a planeza das peças impressas por ambas as tecnologias podem ser observados no gráfico representado na Figura 11. Analisando o gráfico anterior, conclui-se que FDM apresenta melhores valores de planeza que DLP. Estes resultados são discordantes com os teoricamente esperados. Isto pode ser explicado principalmente devido ao tipo de solução de construção em cada uma dessas tecnologias, pois enquanto o fundo do reservatório de resina de DLP é uma película flexível o que afeta a planeza da base durante a construção, a impressora FFF/FDM utiliza uma mesa de vidro como superfície de impressão. Os valores experimentais obtidos para a perpendicularidade das peças impressas em DLP e FDM podem ser observados na Figura 12.

TABELA 3
Limites de resistência e deformação de rutura obtidos nos ensaios

		Limite de resistência (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Deformação de rutura	Média	Desvio Padrão
Resina Transparente	Provete 1	69,70	74,05	5,04	4,30	4,44	0,20
	Provete 2	81,20			4,50		
	Provete 3	72,52			4,45		
	Provete 4	69,65			4,22		
	Provete 5	77,18			4,74		
Resina Cinzenta	Provete 1	40,42	56,11	13,64	4,09	3,57	0,41
	Provete 2	46,36			3,16		
	Provete 3	56,63			3,56		
	Provete 4	61,78			3,18		
	Provete 5	75,35			3,86		
Provete Padrão	Provete 1	41,73	46,25	3,54	3,55	3,81	0,15
	Provete 2	44,77			3,83		
	Provete 3	45,72			3,93		
	Provete 4	51,22			3,90		
	Provete 5	47,80			3,82		
Provete A	Provete 1	79,13	79,27	1,60	10,98	10,98	0,01
	Provete 2	81,73			10,98		
	Provete 3	78,67			10,98		
	Provete 4	77,34			10,98		
	Provete 5	79,50			10,99		

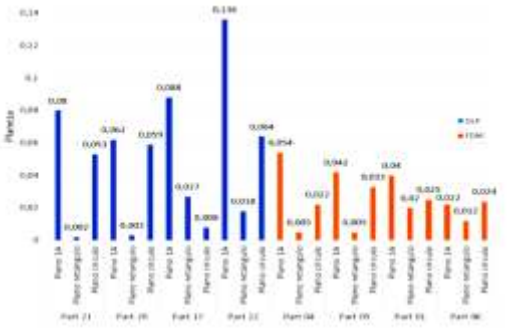


FIGURA 11
Valores de planeza das peças

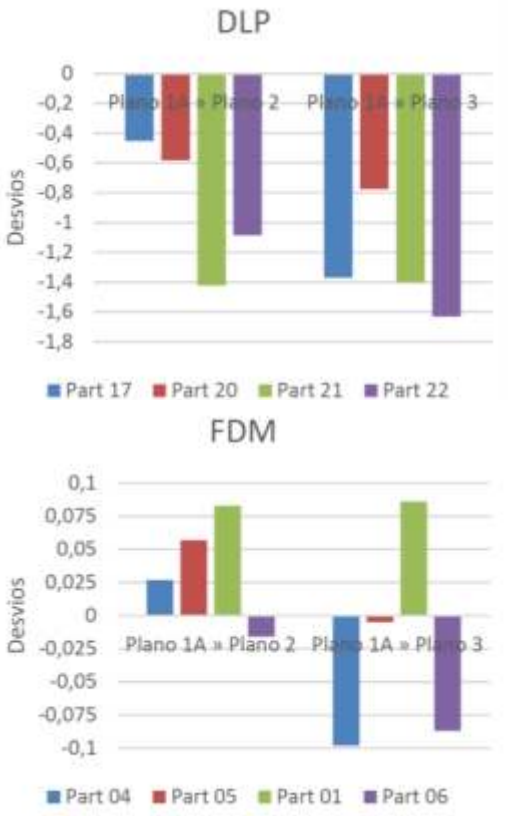


FIGURA 12
Valores de perpendicularidade das peças

Ao comparar os valores de perpendicularidade das peças de DLP e FDM, é possível identificar diferenças nas caraterísticas de impressão das duas tecnologias. O processo de DLP apresenta desvios negativos, ou seja, contração, devido ao processo de cura. Isto é uma caraterística intrínseca da maioria das resinas quando estas são submetidas ao processo de cura.
Os resultados experimentais relativos à cilindricidade das peças impressas estão representados na Figura 13.

Ao analisarmos os valores de cilindricidade obtidos, podemos observar que estes apresentam valores semelhantes. Todas as peças apresentam uma tolerância individual grosseira, com exceção da *Part 17* que apresenta uma tolerância individual média. No entanto, é importante destacar que os resultados indicam que as peças impressas com a tecnologia FDM tendem a exibir desvios com valores ligeiramente maiores em comparação com as produzidas por DLP. Essa discrepância pode ser explicada pelos princípios de funcionamento dos processos de impressão 3D.

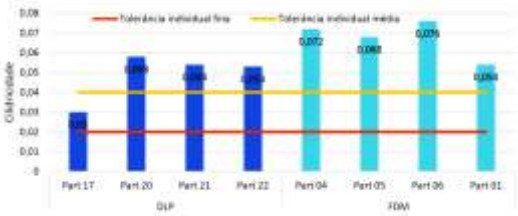


FIGURA 13
Valores de cilindricidade das peças

ANÁLISE DIMENSIONAL

As peças de FDM obtiveram melhores resultados (desvios mais pequenos) em comparação com as peças de DLP. Desta forma, os resultados experimentais obtidos foram diferentes dos teoricamente esperados. As peças impressas por DLP apresentaram os desvios quase todos negativos, pelo que é possível concluir que após serem submetidas ao processo de cura através da luz UV, as peças de DLP sofrem um processo de contração.

As peças FDM apresentam tanto desvios positivos como negativos. Os desvios positivos podem ser explicados por dois motivos. O primeiro deles tem a ver com o comportamento do material no processo de construção das camadas, isto é, relacionado com o esborrachamento das camadas durante o processo de impressão. Este processo envolve a deposição de material termoplástico camada após camada, à medida que o bico extrusor se move horizontalmente. Conforme cada camada é depositada, o material fundido é pressionado contra a camada anterior. Esse movimento de compressão resulta no esmagamento das camadas, o que leva à alteração da forma do filamento, inicialmente circular e posteriormente oval. Portanto, isto conduz ao aumento das dimensões da peça final. O segundo tem a ver com o comportamento do material relativamente ao processo de extrusão. À medida que o filamento é aquecido e depositado, ocorre uma expansão térmica, significando que o material tende a expandir-se. Essa expansão térmica implica que as dimensões da peça final são superiores ao projetado. Por outro lado, os desvios negativos das peças FDM podem ser explicados devido à cinemática do equipamento. A velocidade de

TABELA 4
Valores das tolerâncias fundamentais obtidas nas medições da MMC

DLP	Circulo D24	IT	Circulo D16	IT	Cilindro D36	IT	Furo 1 D6	IT	Furo 2 D6	IT	Furo 3 D6	IT	Furo 4 D6	IT	Furo 5 D6	IT	Furo 6 D6	IT	Média IT	
17	-0,059	10	-0,102	11	-0,242	12	-0,087	12	-0,447	15	-0,079	12	-0,065	11	-0,129	13	-0,086	12	12	
20	-0,197	12	-0,328	14	0,038	8	-0,469	15	-0,481	16	-0,587	16	-0,541	16	-0,394	15	-0,380	15	14	
21	-0,212	13	-0,241	13	0,013	6	-0,590	16	-0,476	15	-0,372	15	-0,404	15	-0,406	15	-0,447	15	14	13
22	-0,21	12	-0,263	13	-0,104	11	-0,341	15	-0,408	15	-0,325	15	-0,319	15	-0,392	15	-0,361	15	14	
		12		13		9		15		15		15		14		15		14		
FDM	**Circulo D24**	**IT**	**Circulo D16**	**IT**	**Cilindro D36**	**IT**	**Furo 1 D6**	**IT**	**Furo2 D6**	**IT**	**Furo 3 D6**	**IT**	**Furo 4 D6**	**IT**	**Furo 5 D6**	**IT**	**Furo 6 D6**	**IT**	**Média IT**	
04	0,037	9	-0,028	9	-0,068	10	0,039	10	0,013	8	0,017	8	0,007	6	-0,003	4	-0,014	8	8	
05	0,058	10	-0,006	5	-0,084	10	0,040	10	0,020	9	0,018	8	0,011	7	0,013	8	-0,007	6	8	
01	0,059	10	-0,038	9	-0,097	11	0,046	10	0,010	7	0,014	8	0,020	9	0,025	9	-0,039	10	9	9
06	-0,073	11	-0,144	12	0,011	5	-0,040	10	-0,061	11	-0,016	8	-0,104	12	-0,068	11	-0,088	12	10	
		10		9		9		10		9		8		9		8		9		

movimento dos eixos durante a impressão desempenha um papel fundamental. A velocidade de movimento dos eixos tende a "apertar a trajetória". Este fenómeno é consequência da inércia do sistema de movimento da impressora 3D. A inércia do sistema causa um pequeno atraso no movimento, o que significa que a impressora continua a movimentar-se por um curto período de tempo mesmo após receber a ordem de paragem. Esse atraso resulta na acumulação de excesso de material, resultando na redução das dimensões das peças. Além do referido anteriormente, a velocidade utilizada nos parâmetros de impressão foi a definida pelo software, podendo não ser a mais indicada para esta peça em específico.
As medições obtidas pela MMC e o respetivo toleranciamento podem ser observadas na Tabela 4.

É possível concluir que na globalidade, ao processo de FDM pode ser atribuído uma qualidade IT9 (qualidade média/fina) e ao processo de DLP uma qualidade IT13 (qualidade média/grosseira).

CONCLUSÕES

Neste estudo, foi possível concluir que a Ultimaker S5 possui um volume de construção aproximadamente 93% vezes maior (330 x 240 x 300 mm - 2,376x107 mm³) em comparação com a Anycubic Photon Mono (130x80x165 mm - 1,716 x 106 mm³). A Ultimaker S5 apresenta para o extrusor utilizado (0,4 mm de diâmetro) uma variação entre 0,1 e 0,3 mm para a resolução da camada, enquanto a Anycubic Photon Mono apresenta uma variação entre 0,01 e 0,15 mm. Quanto à altura da camada utilizada na Ultimaker S5 e na Anycubic Photon Mono, foram empregues os valores de 0,1mm e 0,05 mm respetivamente.

Em relação à qualidade de impressão, observamos que o DLP, resulta em peças com superfícies mais suaves, lisas, homogéneas e sem marcas visíveis.

A análise de custos revelou que para peças pequenas, como os provetes, utilizar a tecnologia DLP é cerca de 16% mais barato (0,32€ para FDM vs 0,27€ para DLP). Por outro lado, em peças de médio porte, caso do modelo GD&T, utilizar a tecnologia FDM é cerca de 18% mais barato (3,25€ para DLP vs 2,67€ para FDM).

Analisando a fase de preparação e fabrico das peças, mais concretamente do tempo de configuração das máquinas foi possível concluir que a impressora de FFF/FDM tende a ser cerca de 23% superior. Isto apesar da ULTIMAKER S5 apresentar um menor número de etapas (4), comparativamente com ANYCUBIC (6). A complexidade de operação uma impressora DLP é significativamente superior. Na tecnologia FFF/FDM o utilizador não necessita de realizar nenhuma operação, apenas tem de esperar que a máquina realize as suas funções, ao contrário da tecnologia DLP, onde a etapa de limpeza dos equipamentos, acaba por ser a mais demorada e complicada de todas. O processo de configuração da impressora DLP exige um pouco mais de conhecimento técnico e ajustes precisos, ao contrário do processo de configuração da impressora de FDM, que é um pouco mais demorado, mas a impressão em si pode ser realizada de maneira mais direta e contínua. Relativamente ao tempo de impressão das peças foi possível concluir que os tempos de impressão na tecnologia DLP foram inferiores aos tempos de impressão na tecnologia FFF/FDM, com diferenças quase sempre superiores a 50%. A impressão do modelo físico com tecnologia DLP acabou por ser mais desafiador do que o previsto. Foram necessárias sete tentativas, de modo a obter a peça de acordo com o desejado. Fatores como a

orientação da peça, a utilização adequada de suportes, a seleção correta dos parâmetros de impressão e a remoção da base de ligação foram determinantes para isso. O tempo de pós-processamento também foi diferente para ambas as tecnologias.

Os resultados obtidos nos ensaios de flexão de 3 pontos, evidenciou que as curvas tensão-deformação dos provetes fabricados a partir de resina (tanto transparente quanto cinzenta) e PLA (nas variantes Provetes A e Padrão) exibiram perfis distintos no que toca ao comportamento mecânico. Sendo que os provetes de resina revelam um comportamento típico de fratura frágil e os provetes de FFF/FDM um comportamento de natureza dúctil. Os provetes do tipo A foram os únicos que não sofreram fratura, realçando a importância da densidade do infill na resistência final dos provetes.

Dos resultados da análise GD&T efetuada sobre uma peça tipo e começando pela planeza, a tecnologia FFF/FDM apresentou melhores valores que DLP. Em relação à perpendicularidade, as peças impressas por DLP apresentam os desvios todos negativos, enquanto em FFF/FDM são na maioria positivos. Na cilindricidade, as peças FFF/FDM tendem a oferecer desvios um pouco maiores em comparação com as peças DLP. Na análise dimensional, as peças de FDM apresentaram desvios menores em comparação com as peças de DLP, sendo possível concluir que na globalidade, ao processo de FFF/FDM pode ser atribuído uma qualidade IT9 e ao processo de DLP uma qualidade de IT13.

Em resumo, por meio da análise comparativa adquiriu-se informações valiosas que auxiliam na seleção da tecnologia mais adequada para diferentes aplicações e necessidades específicas. Através da caraterização mecânica das peças foi possível obter informações fundamentais para a compreensão das suas propriedades físicas/estruturais e desempenho mecânico. A análise GD&T das peças produzidas proporcionou conhecimentos valiosos para a compreensão de como essas tecnologias se comportam em relação à precisão dimensional e à conformidade com tolerâncias críticas em peças impressas em 3D.

REFERÊNCIAS

[1] I. Jasiuk, D. W. Abueidda, C. Kozuch, S. Pang, F. Y. Su, e J. McKittrick, "An Overview on Additive Manufacturing of Polymers", JOM, vol. 70, n.o 3, pp. 275-283, mar. 2018, doi: 10.1007/s11837-017-2730-y.

[2] A. Ambrosi e M. Pumera, "3D-printing technologies for electrochemical applications", Chem. Soc. Rev., vol. 45, n.o 10, pp. 2740-2755, 2016, doi: 10.1039/C5CS00714C.

[3] "ISO/ASTM 52900". [Em linha]. Disponível em: https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso-astm:52900:ed-2:v1:en

[4] A. E. Patterson, P. D. Collopy, e S. L. Messimer, State-of-the-Art Survey of Additive Manufacturing Technologies, Methods, and Materials. Unpublished, 2015. doi: 10.13140/RG.2.2.33894.47684/2.

[5] C. Relvas, O Mundo da Impressão 3D e o Fabrico Digital, (1a ed.) (L. Quântica Editora - Conteúdos Especializados, Ed.). Booki - Conteúdos Especializados, 2018.

[6] "3DEXPERIENCE - 3D PRINTING - ADDITIVE". Acedido: 3 de fevereiro de 2023. [Em linha]. Disponível em: https://make.3dexperience.3ds.com/processes/photopolymerization

[7] Desktop Metal, "DLP Ultimate Guide". [Em linha]. Disponível em: https://www.desktopmetal.com/resources/ultimate-guide-dl

O FABRICO ADITIVO POR EXTRUSÃO (MEX) E OS MATERIAIS METÁLICOS

Daniel Gatões[1], Patrícia Rodrigues[1], Bernardo Alves[1], Gonçalo Oliveira[1], Luís Cacho[1], Diogo Neto[1], Teresa Vieira[1]

1 Centre for Mechanical Engineering, Materials and Processes (CEMMPRE) - Advanced Production and Intelligent Systems, Associated Laboratory (ARISE), Departmento de Engenharia Mecânica, Universidade of Coimbra, Rua Luís Reis Santos, Pinhal de Marrocos, 3030-788 Coimbra, Portugal.

O MEX é uma das tecnologias mais promissoras para o fabrico aditivo de objetos 3D, onde a especificidade geométrica, tolerâncias, reprodutibilidade e custo são as suas mais valias. A universalidade deste processo onde a diferença de características dos materiais pouco pode influir no produto, evidencia que são os defeitos os mandatários da qualidade final. O presente artigo, através de uma análise SWOT do MEX, evidencia os caminhos necessários ainda a percorrer nas áreas de investigação de modo a se poder dispor em breve de uma tecnologia de eleição para as áreas mecânicas, médica, aeroespacial e afins. A utilização de metamateriais dependerá também do êxito da investigação em MEX.

PALAVRAS-CHAVE:
MEX, SWOT, FILAMENTO, CARBONETO DE TUNGSTÉNIO, LIGAS FERROSAS, AÇOS INOXIDÁVEIS, LIGAS NÃO FERROSAS, COBRE, SIMULAÇÃO

1. INTRODUÇÃO

Quando se fala de tecnologias aditivas para processamento de pós metálicos, intuitiva-mente se associa a processos de fabrico a partir de pós, onde a fusão/solidificação ocorre, ou seja que implicam, na maior parte dos casos, a presença de estado líquido, resultante da ação de uma fonte de energia laser ou feixe de eletrões, nos denominados processos por fusão em cama de pó (*Powder Bed Fusion*), onde se inclui a fusão seletiva por laser (SLM), para além da deposição de energia direta (DED) onde se inclui o fabrico aditivo por arco (WAAM) [1].

Contudo, no final da última década (2018) começaram a assumir importância significativa no fabrico aditivo de pós metálicos os denominados processos indiretos, em particular a extrusão de pós metálicos (MEX), inspirada essencialmente na injeção/extrusão de pós metálicos (PIM) e na impressão 3D de polímeros, onde um filamento polimérico é extrudido através duma fieira e o objeto 3D é construído camada a camada (FDM). No caso de pós metálicos, estes funcionam como carga de materiais orgânicos, em particular polímeros, doravante denominados por ligantes e aditivos dos pós metálicos, cuja relação carga:polímero obedece a uma concentração volúmica crítica de pós (CVCP) de modo a garantir as características reológicas adequadas a uma impressão 3D [1,2]. É consensual que o MEX tem vantagens associadas aos itens seguintes:

Custos: custo de equipamento muito mais baixo, em particular se se comparar com os equipamentos de PBF.

Material (filamento): Tal como no PIM os filamentos resultantes da matéria-prima preparada, podem ser mais adequados/versáteis, do que os pós de per si usados noutros processos, tendo em vista a aplicação desejada. E economicamente viáveis se forem produzidos pelo fabricante de objetos 3D; de notar que os pós metálicos usados no SLM, tem maior tamanho de partícula do que os de MEX, logo tendencialmente preço menos elevado.

Facilidade de uso: Configuração e operação mais simples. As impressoras MEX são normalmente mais fáceis de configurar e operar do que qualquer equipamento de tecnologia direta.

Menor manutenção: Os equipamentos

envolve temperaturas mais baixas e não requer laser/feixe de eletrões, reduzindo os riscos de segurança em comparação com PBF. A ausência de pós metálicos: o manuseio de filamentos de matriz termoplástica é mais seguro e limpo do que lidar com pós metálicos diretamente como os usados no fabrico direto.

Eficiência no uso do pó: Quantidade de resíduos de pó mínima se comparado com os processos diretos. É também possível recuperar os objetos 3D em verde, que não satisfaçam às condições exigidas pela aplicação.

Para além das vantagens enunciadas, o MEX tem-se vindo a revelar como podendo ser o processo ideal, quando é fundamental:

Precisão e Exatidão:

a) Elevada resolução: Com o MEX pode se atingir uma elevada resolução para conseguir detalhes micrométricos tornando o processo adequado para objetos 3D com zonas de elevada precisão, canais internos de arrefecimento de elevada eficácia, por exemplo insertos de injeção e ferramentas de corte, ou mesmo para a construção de estruturas de metamateriais adequadas para cumprirem propriedades inusitadas para metais.

b) Tolerâncias apertadas: o MEX pode vir a ser crucial para muitas aplicações industriais em particular relacionadas com a área aeroespacial.

Contudo, há necessidade de analisar criticamente o processo versus material. Assim, baseado no trabalho de investigação realizado nos últimos anos no CEMMPRE sobre o MEX de materiais com ligação metálica, o objetivo fundamental do presente artigo é contribuir, para uma análise crítica do processo de fabrico MEX&Materiais, suportada por uma análise SWOT.

2. ANÁLISE CRÍTICA DO PROCESSO

O processamento MEX de ligas metálicas é caracterizado por 3 etapas principais (processo indireto) que é necessário controlar: conformação do objeto 3D, eliminação de ligante (debinding) e sinterização. No entanto, antes de iniciar o processo de conformação ou impressão é necessário partir de uma mistura de ligantes e aditivos com o pó metálico, tipicamente sob a forma de filamento [3]. Esta etapa de mistura, e posterior extrusão de filamento, é de capital importância para todo o processo MEX, já que vai ditar o comportamento do filamento durante a conformação. Para uma correta mistura de componentes, após seleção de pó metálico e ligantes e aditivos, é necessário avaliar o binário de mistura e determinar o volume crítico de pó. O valor do binário irá determinar a processabilidade da mistura, na medida em que quanto maior este valor, mais difícil será de processar, enquanto que a sua estabilização durante a mistura será um indicador de homogeneidade. A Figura 1 apresenta um comportamento comum de um aço austenítico 316L quando misturado com um ligante à base de polioximetileno (POM) e outros aditivos, em quantidades variáveis. O CVCP é determinado através da medição do binário de mistura mediante incrementos de carga metálica para a mesma quantidade de ligante + aditivos. Quando o valor do CPVC é ultrapassado, é possível verificar um aumento abrupto do valor do binário de mistura (Figura 2). Diferentes ligas metálicas, ou até mesmo pós da mesma liga com características diferentes apresentam valores CPVC distintos. Utilizar misturas com composição próxima do volume crítico de pó tem uma grande influência na redução da porosidade final do objeto 3D, embora sacrificando alguma processabilidade.

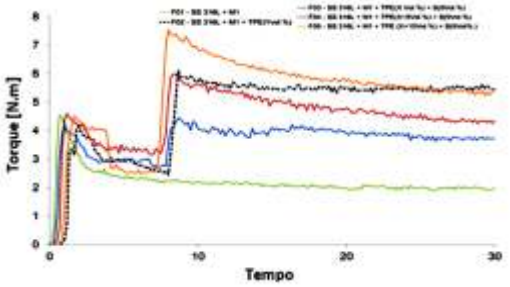


FIGURA 1
Variação do binário da mistura do aço AISI 316L função do tempo para várias composições

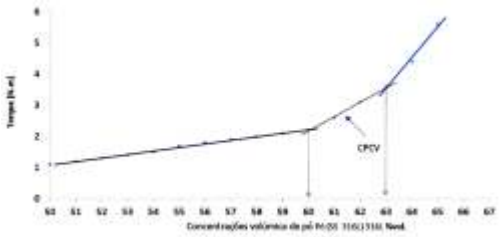


FIGURA 2
Determinação do CPVC da matéria prima: aço AISI 316L + ligante + aditivos

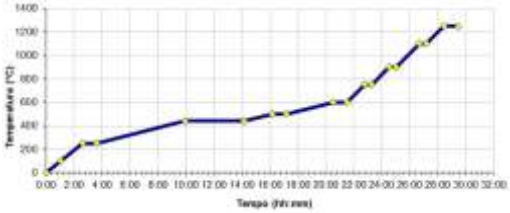


FIGURA 3
Ciclo térmico de debinding e sinterização para uma mistura de aço AISI 316L (60% vol.)

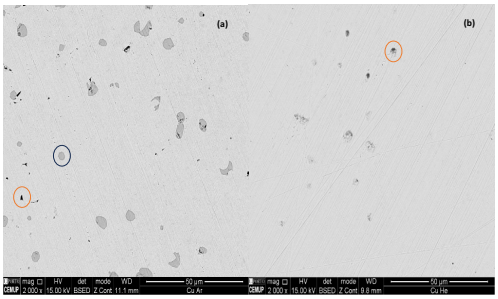


FIGURA 4
Superfície de cobre após sinterização em Ar (a); e He/H2 (b). Porosidade assinalada a vermelho e óxidos a azul.



FIGURA 5
Provetes (cobre) após tratamento térmico com diferentes atmosferas protetoras.

Após o cálculo do CPVC e a obtenção de um valor de binário estável e adequado, é obtido a matéria-prima (*feedstock*), que passará por uma extrusora para produção do filamento. Apenas após estes passos se pode iniciar a etapa de conformação do objeto 3D, no qual o filamento produzido irá ser novamente extrudido através do bico de extrusão da impressora 3D, a uma temperatura semelhante à temperatura de extrusão para produção de filamento, construindo a peça camada a camada e seguindo as coordenadas fornecidas previamente através da geração de um G-code. Após conformação, é obtida a peça em verde, que é composta por uma mistura de pó metálico e ligante polimérico. Em seguida, são necessários os passos de eliminação de ligante e sinterização para remover o ligante e consolidar as partículas metálicas, respetivamente [4, 5].

Qualquer que seja o tipo de eliminação de ligante (térmico, catalítico ou solvente), terá sempre que haver pelo menos uma parte do ligante a ser removido por tratamento térmico obtendo-se a peça denominada castanho (sem ligante/aditivo). Contudo, ainda sem estar totalmente consolidada para ser manuseável, a temperatura máxima de tratamento deverá atingir 700 °C. Após a remoção completa do ligante, é necessário sinterizar, com o ciclo adequado ao material em questão. Um ciclo completo de eliminação de ligante por via térmica e sinterização está representado na Figura 3. Este processo tem de ser realizado sob atmosfera protetora para evitar ou mesmo eliminar oxidação do pó metálico, sendo recomendada a utilização de hidrogénio como elemento redutor. A Figura 4 apresenta imagens SEM que comparam o efeito de duas atmosferas distintas, Ar (100%) e He:H2 (95:5%). É possível verificar a formação de óxidos quando a atmosfera é de árgon, bem como uma maior presença de porosidade. Esta diferença poderá ser atribuída ao maior tamanho do átomo de Ar face à do He ou do H2, que se retida durante a consolidação contribui para a porosidade de maior tamanho. Para estas duas atmosferas, é ainda visível a diferença de cor das amostras (Figura 5) [3,6].

2.1. ANÁLISE SWOT

Uma análise SWOT (*Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats*) ajuda a evidenciar o papel e o impacto do MEX no fabrico de objetos 3D com ligação metálica. Esta abordagem analítica fornece uma visão abrangente dos pontos fortes, fraquezas, oportunidades e ameaças associadas a esta tecnologia inovadora. Através da identificação dos aspetos internos e externos que influenciam a extrusão de pós de materiais metálicos, podemos não apenas destacar as vantagens competitivas e os desafios técnicos, mas também explorar novas oportunidades de aplicação e avaliar os riscos potenciais. Esta análise é interessante para orientar decisões estratégicas, promover o desenvolvimento tecnológico e garantir que a indústria maximize os benefícios do fabrico aditivo enquanto mitiga possíveis ameaças.

2.1.1 FORÇAS (S)

As forças da extrusão de materiais metálicos incluem a capacidade de produzir peças complexas com elevada precisão e integridade estrutural. O MEX permite o fabrico de componentes com geometria complexa que seriam difíceis ou impossíveis de criar com métodos diretos. A redução do desperdício de material durante o fabrico é outro ponto forte significativo, contribuindo para a eficiência e sustentabilidade do processo. Além disso, a versatilidade da utilização de diversos materiais metálicos, tais como, aço inoxidável, cobre, carboneto de tungsténio, ligas de titânio e alumínio e seus compósitos oferecem propriedades específicas para diferentes aplicações. Neste contexto, são apresentadas algumas das características dos objetos 3D de diferentes materiais investigados no CEMMPRE [3 - 5, 7, 8].

A. CARBONETO DE TUNGSTÉNIO E COBALTO (WC-CO)

O carboneto de tungsténio e cobalto (WC-Co) é um excelente candidato para ser aliado ao MEX, tendo como principal vocação a utilização na

produção de ferramentas de corte. Este material beneficia largamente de tecnologias de conformação/consolidação na fase sólida (como o MEX) [9]. O MEX permite conformar os pós a uma baixa temperatura para posteriormente serem consolidados gradualmente num ambiente de atmosfera, tempo e pressão controlados, de forma a garantir o estreito equilíbrio da microestrutura de WC-Co [9 - 11]. Durante o processo de mistura, os binários atingidos são normalmente superiores aos de aços e outros materiais não-ferrosos [6, 8 - 11]. Atendendo ao interesse de incluir canais internos nas ferramentas de corte, o tamanho de furo circular mínimo que se consegue imprimir é cerca de 1 mm na vertical, sendo que furos/estruturas horizontais deveram ter alterações geométricas que não incluam paredes ou tetos que necessitem de sustentação (ângulos >45°) (Figura 6) [11]. Devido à estratégia de impressão do MEX, os objectos 3D possuem todos um acabamento superficial caracterizado pela estratificação de camadas e contornos de extrusão, tendo as superfícies laterais os maiores valores de rugosidade [11]. Após a remoção do ligante orgânico (até 600° C em H2), a sinterização das ferramentas é realizada em atmosfera de árgon até cerca de 1500 °C e com uma pressão isostática de 3 MPa. Esta etapa de consolidação é crucial para garantir uma microestrutura similar à convencional, livre de grafite e fase eta, e minimizar a porosidade. No entanto, porosidades macroscópicas, causadas pela estratégia de impressão ou por defeitos de remoção de ligante orgânico, não poderão ser corrigidas [12, 13]. Desta forma, é obrigatória uma etapa de eliminação de ligante que não danifique a geometria da ferramenta; e as estratégias de impressão que diminuam o número de defeitos locais (Figura 7). O uso de canais e padrões de enchimento parcial podem contribuir para a remoção de ligante orgânico, assumindo uma dupla funcionalidade (Figura 7) [11].

As potencialidades da aplicação do MEX com WC-Co ainda estão pouco estudadas e exploradas, não havendo produtos concretos no mercado da maquinagem. Atualmente, o CEMMPRE tem uma linha de investigação que visa conciliar as vantagens do MEX para criar novas gamas de produtos, com sistemas de refrigeração personalizado, que se adequem aos processos que gerem grandes quantidades de calor.

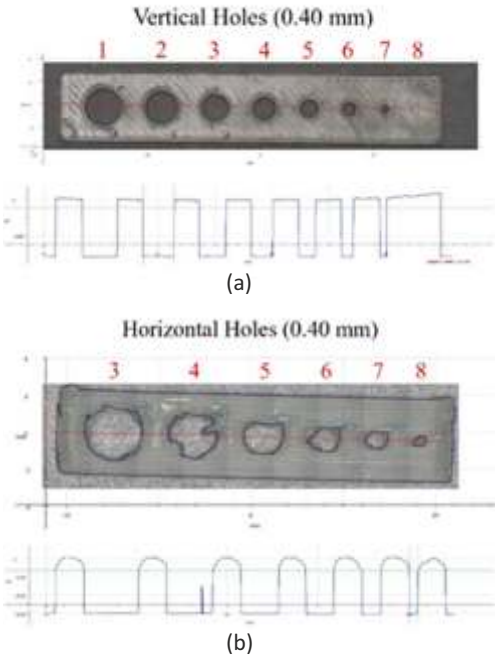


FIGURA 6
Medição do perfil de furos verticais (a); medição do perfil de furos horizontais (b). (adaptado de [11]*).*

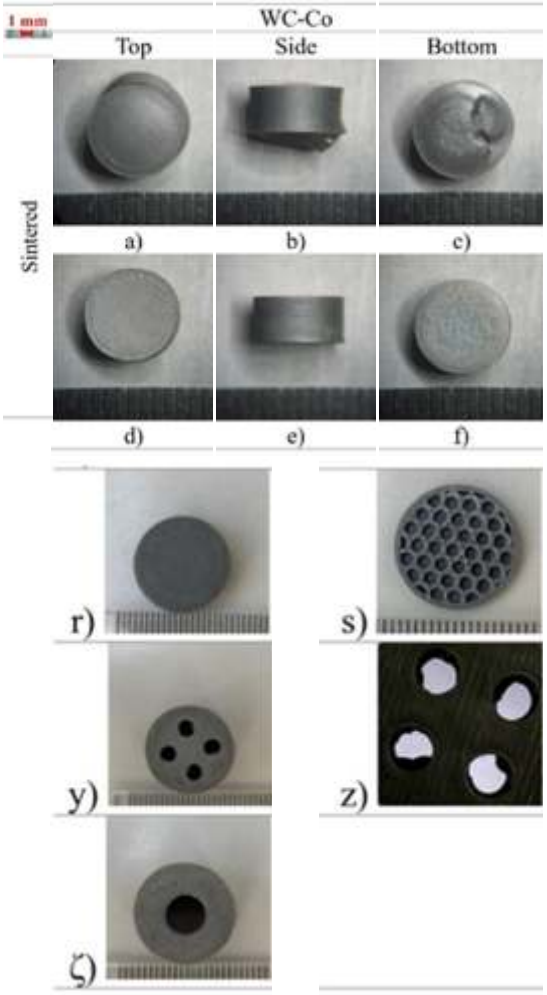


FIGURA 7
Cilindro de WC-Co sinterizado com e sem defeitos de eliminação do ligante (a, b, c) e (d, e, f); Exemplos de canais e estruturas internas de dupla funcionalidade (r; s, y, z, ζ) (adaptado de [11]*).*

B. LIGAS FERROSAS - AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS

Os aços inoxidáveis representam a maior fatia do mercado de aços no fabrico aditivo, com maior expressão no Selective Laser Melting

(SLM) [1]. A utilização do MEX para aços inoxidáveis destaca-se, como já referido, não só pela maior acessibilidade e menor custo dos equipamentos, mas também pela possibilidade de reaproveitamento de resíduos (verdes) como matéria-prima. A Figura 8 apresenta alguns exemplos de peças de AISI 316L impressas via MEX, no estado verde e após sinterização.

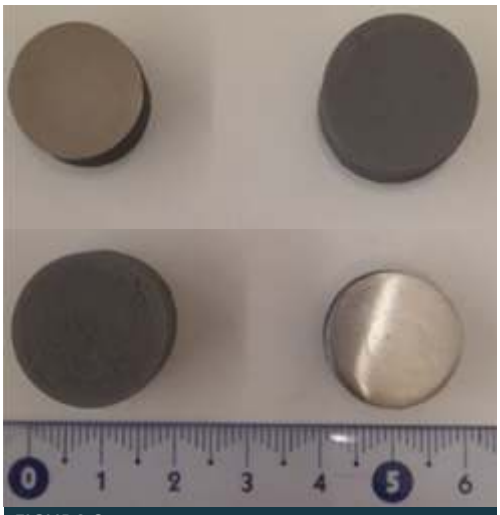


FIGURA 8
Aço inoxidável 316L produzidos via MEX, no estado verde e após sinterização

C. LIGAS NÃO FERROSAS - COBRE

O cobre, ao contrário do aço inoxidável, apresenta elevada refletividade e condutibilidade térmica, o que dificulta o processamento por laser. Equipamentos comerciais de SLM utilizam tipicamente comprimentos de onda da ordem dos 1000 a 1100 nm, que são refletidos até 98% pelo cobre puro [10]. Para combater este efeito, são utilizados lasers com menor comprimento de onda, mas não elimina totalmente o efeito da refletividade. Assim, o MEX emerge como uma excelente tecnologia para o fabrico aditivo de cobre puro. O seu processamento via MEX, no diz respeito à conformação, é também semelhante ao dos aços inoxidáveis e ao WC-Co, com a exceção do efeito da elevada condutividade térmica do cobre, sendo recomendada a não utilização das ventoinhas e uma temperatura da base mais elevada, para contrariar o efeito da contração rápida da peça com o arrefecimento, causa de defeitos [3]. Tal como se verifica na Figura 5, o impacto da atmosfera na microestrutura é visível por observação direta nos provetes produzidos por MEX, através das diferenças na cor.

2.1.2 FRAQUEZAS (W)

Uma das principais fraquezas do MEX está associada à limitação de tamanho das peças que podem ser fabricadas por este processo de fabrico. Os equipamentos de impressão atuais possuem restrições em termos de dimensões máximas das peças, o que pode limitar a aplicação desta tecnologia para componentes maiores. Isso significa que, para o fabrico de grandes estruturas, outras técnicas de fabrico podem ser mais adequadas.

A velocidade de produção é também um fator crítico na comparação entre a extrusão de materiais metálicos e métodos diretos de fabrico aditivo. Embora a tecnologia aditiva seja mais rápida para a criação de protótipos e peças únicas, a produção em série pode ser significativamente mais lenta.

Para além destes desafios é crucial para aproveitar plenamente os benefícios desta tecnologia emergente e usar a simulação como a ferramenta essencial para minimizar outras possíveis fraquezas do processo.

As características de produção estão também associadas a uma disrupção no desenvolvimento do produto e no projeto de engenharia. A utilização de ferramentas que reduzam os tempos de resposta no desenvolvimento de matérias-primas, produto e na determinação dos parâmetros de fabrico é essencial. Para além da rápida resposta no design, é importante a qualificação e certificação de objetos que no seu interior tenham porosidades. Nesse sentido, a simulação numérica e a modelação multiescala utilizando conceitos de homogeneização apresentam-se como ferramentas fulcrais presentes em todas as fases do projeto de engenharia de AM(MEX).

I. SIMULAÇÃO NUMÉRICA

No MEX, a importante aplicação de ferramentas de simulação abrange todas as etapas do processo. Em alguns casos, ferramentas de elementos finitos são vendidas em complementaridade ao equipamento de impressão 3D. Em relação à tecnologia de fabrico aditivo MEX, as três tipologias a destacar da utilização dos métodos dos elementos finitos são as simulações térmicas, termomecânicas e mecânicas. As simulações térmicas permitem otimizar taxas de aquecimento e estágios térmicos da etapa de eliminação do ligante com o objetivo de remover todo o material orgânico [14]. Por sua vez as simulações termomecânicas ajudam na previsão de deformações na sinterização e na conformação do objeto 3D [15, 16]. Estas análises permitem uma adaptação do CAD inicial do objeto 3D, compensando a geometria para as deformações que ocorrem nos ciclos térmicos e alertando para a necessidade de adição de suportes. A simulação mecânica estrutural tem uma vasta aplicabilidade e

permite dar suporte ao processo de fabrico aditivo MEX desde o design, processamento até à certificação e qualificação dos objetos 3D metálicos finais mesmo quando há porosidade. Conceitos de homogeneização por elementos finitos, utilizando elementos representativos de volume (RVE) podem ser usados para prever as propriedades de uma mistura de ligante e aditivos com partículas de pó, permitindo a caracterização das propriedades de um determinado filamento variando tanto a componente orgânica (polímeros), como o material e percentagem de volume do pó (metal) [17]. Assim, é possível reduzir o número de iterações experimentais na conceção de filamentos que devem ter rigidez para ser comprimidos axialmente e extrudido e flexibilidade para ser enrolados e armazenados na bobine antes da conformação, usando o *hardware* de uma impressora. Outro aspeto de real importância será a utilização de ferramentas de simulação multiescala para prever o comportamento mecânico anisotrópico característico da orientação da impressão 3D e dos parâmetros usados para o preenchimento das consecutivas camadas do objeto. Através do mapeamento das porosidades ao longo do fio extrudido usando as coordenadas do G-code gerado pelo software de parametrização de impressão 3D, poderia ser possível estudar, caso a caso, a correta orientação de impressão e os parâmetros adequados para o preenchimento a usar em função do desempenho mecânico final.

Simulações mecânicas estruturais podem também ser utilizadas para prever o comportamento mecânico de componentes metálicos com porosidades fabricados por MEX [18]. Após o controlo dimensional por microtomografia computorizada (µCT), o mapeamento das porosidades na malha de elementos finitos estrutural permite discretizar uma fração de volume de poro em cada ponto de integração. As propriedades do material em função da sua fração de volume de porosidade são estimadas usando modelos semianalíticos utilizando o conceito de RVE composto por uma matriz metálica e um poro esférico. Como podemos ver na Figura 9, a utilização de metodologias de modelação multiescala podem ajudar na certificação ou qualificação de objetos 3D com porosidades internas, evitando a rejeição de componentes com um custo elevado associado de produção e de material [7].

Toda a flexibilidade que o MEX oferece acarreta uma necessidade de variar parâmetros caso a caso, dependendo da funcionalidade, do material e da geometria a fabricar. Em suma, é evidente que a simulação numérica assume um papel importante e se destaca como uma técnica fulcral que é capaz responder à procura do Ikigai (procura da razão e do propósito em algo). No entanto, é importante notar que a utilização dos elementos finitos requer avaliação cuidada de propriedades de materiais, de condições de fronteira e discretização. Todas as análises numéricas devem ser acompanhadas por resultados experimentais válidos. A falha na definição de parâmetros poderá levar a um afastamento da realidade e cancelará qualquer capacidade preditiva.

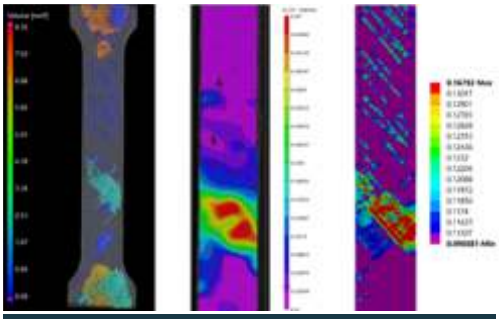


FIGURA 9
Simulação mecânica estrutural para prever o comportamento mecânico de objetos 3D metálicos fabricados por MEX com porosidades: a) análise dimensional (µCT); b) análise de campos de deformações durante teste de tração uniaxial; c) Resultados de campos de deformações de uma simulação numérica após o mapeamento das porosidades na malha estrutural no mesmo instante do ensaio experimental. (adaptado de [18]).

2.1.3 OPORTUNIDADES (O)

MEX apresenta diversas oportunidades promissoras, donde é a salientar o desenvolvimento de novos materiais, p.ex. metamaterais, via fabrico aditivo. Este avanço pode otimizar propriedades, estrutura, comportamento térmico e mecânico, resultando em materiais perfeitamente adequados para aplicações específicas.

A expansão de mercado também é uma oportunidade significativa. Setores como de moldes, aeroespacial, médico e automóvel estão cada vez mais em busca de peças complexas e de precisão, customizadas.

Além disso, o fabrico aditivo pode contribuir significativamente para a sustentabilidade. O MEX de materiais metálicos tende a reduzir o desperdício de material, uma vez que apenas a quantidade necessária de pó metálico é usada para fabricar o objeto 3D [10].

2.1.4 AMEAÇAS (T)

A extrusão de materiais metálicos no fabrico aditivo enfrenta diversas ameaças que podem impactar sua adoção e viabilidade. A concorrên-

cia de tecnologias tradicionais, como a fundição e a maquinagem, é uma das principais ameaças. Essas tecnologias continuam a evoluir e, frequentemente, mantêm vantagens competitivas significativas em termos de custo e escalabilidade.

Os desafios tecnológicos também representam uma ameaça significativa. Problemas técnicos relacionados com a consistência e qualidade das peças fabricadas podem limitar a sua adoção. A variabilidade nas propriedades mecânicas das peças pode também exigir pós-processamentos adicionais para atender às especificações desejadas, aumentando os custos e o tempo de produção. Além disso, a manutenção de parâmetros de processo com elevada precisão é fundamental para garantir a repetibilidade e a confiabilidade das peças produzidas. µCT é um recurso que pode minimizar estas ameaças, uma vez que é a mais indicada para o controlo de qualidade, no que diz respeito aos defeitos internos, em cada etapa do processo. Na verdade, a maior ameaça provém sem dúvida da ocorrência de defeitos estocásticos, durante todo o processo de fabrico desde a matéria-prima, filamento, consolidação, e os outros passos do MEX.

I. DEFEITOS

O MEX, assim como outras tecnologias de fabrico aditivo, está sujeito à ocorrência de vários defeitos que podem comprometer a qualidade final dos objetos 3D fabricados. A deteção eficaz destes defeitos exige técnicas não destrutivas (NDT), que permitam fornecer informação detalhada dos defeitos presentes sem a destruição total ou parcial do objeto em avaliação. Entre as várias técnicas, o µCT toma a dianteira na sua capacidade de observar defeitos internos à escala micrométrica, com a possibilidade diferenciadora de analisar o tamanho, morfologia e localização dos defeitos no objeto 3D [19].

O MEX, sendo uma tecnologia indireta, os defeitos podem ser categorizados pela sua origem em cada uma das suas três fases principais do processo: preparação da matéria-prima, conformação e consolidação. Estas três categorias de defeitos, apesar de diferentes em origem, estão, no entanto, correlacionados.

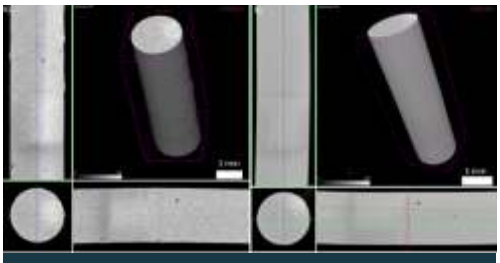


FIGURA 10
2D e 3D da diferença entre filamento a) pré e b) pós-otimização.

No que se refere à preparação da matéria-prima, os defeitos têm a sua origem na não otimização das misturas que originam o filamento. Para além da importância do CVCP, há que garantir a molhabilidade do ligante e aditivos em relação ao pó [20]. Na fase de extrusão do filamento, é também necessário que a temperatura de extrusão não resulte na degradação parcial do polímero. A extrusão tem de ser contínua e promover uma constância dimensional, sob a pena do extrudido ser dimensionalmente instável, o que resultará em sub- ou sobreextrusão. A Figura 10 mostra a diferença entre um filamento não otimizado e um filamento após otimização, onde detalhes como a circularidade, redução de defeitos estocásticos e distribuição homogénia dos componentes da mistura é essencial para a qualidade do objeto 3D [3].



FIGURA 11
2D e 3D da diferença entre extrudido a) pré e b) pós-otimização.

Na fase de conformação, os defeitos estão diretamente relacionados com o extrudido e a sua dinâmica aquando do fabrico. O filamento após extrusão na impressora 3D, pode sofrer uma variação dimensional de 1,75 para 0,40 mm (comumente, podendo pelo menos ir até 100 µm, em bicos de extrusão convencionais. A impressora extrude o filamento correlacionando a velocidade de alimentação com o movimento de translação definido pela geometria a imprimir (e cada uma das linhas que a constitui). Assim, é necessário garantir que a alimentação terá sempre uma relação contínua com este movimento, sendo que alterações no diâmetro do filamento, tal como descrito acima, irão alterar esta dinâmica, resultando em extrudido inconstante ou com diâmetro diferente do valor considerado anteriormente. Esta sub- ou sobre extrusão, apenas quando constante, poderá ser corrigida através de alteração de um fator de multiplicação. Durante a impressão poderão também surgir vazios no preenchimento da geometria. Estes poderão resultar de erros

pontuais, como a interrupção temporária da extrusão; movimentos repentinos que levam a separação entre extrudidos por arrastamento; extrusão não propositada, devido à temperatura do bico de extrusão ser demasiado alta, promovendo a mobilidade do elemento orgânico; baixa adesão entre extrudidos, seja intracamada ou entrecamadas. A Figura 11 demonstra as consequências, no extrudido, de uma mistura não-homogénea e de um tamanho de pó inadequado, resultante num extrudido inconstante, que induz falhas estocásticas, má adesão e vazios [4 - 6, 21, 22].

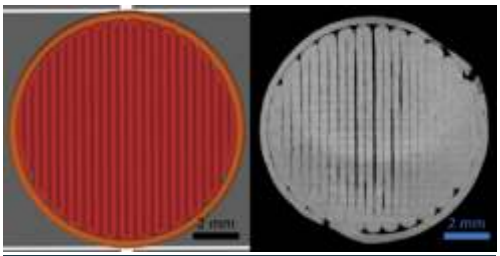


FIGURA 12
Diferença entre o caminho planeado, demonstrando vazios originados pela circularidade e inadequação do diâmetro do extrudido em relação ao valor planeado.

Os defeitos podem também resultar da tradução deficiente da geometria da camada a um conjunto de linhas de extrudido, o que ocorre quando a distância entre paredes não é múltipla do diâmetro do extrudido ou quando elementos curvos estão presentes (Figura 12). A nível do objeto 3D, alguns defeitos podem também ser identificados, como protuberância na zona da base, devido ao achatamento resultante da sua presença, criando nesta zona extrudidos com um diâmetro acima do esperado, este efeito é também conhecido como "pata de elefante". A geometria do objeto poderá também ser assim comprometida, podendo ocorrer empenos, efeito de escada, entre outros que originam desvios na geometria esperada.

Finalmente, na fase da consolidação, poderão surgir defeitos relacionados com uma eliminação deficiente do ligante e da própria sinterização. Assim, durante a eliminação do ligante pode-se ter a destruição parcial da geometria, devido a um design inapropriado ou falta de suportes ou mesmo à destruição total do objeto 3D. Este passo do processo, poderá também não ser eficaz na eliminação do componente orgânico, devido a tempo ou temperatura insuficiente. No entanto, velocidades de eliminação de ligante demasiado elevadas levam também à possibilidade de uma ustulação descontrolada da parte orgânica, causando bolhas de gás que podem resultar em delaminação ou em deformação de todo o objeto 3D. Após sinterização, pode ser observado também, devido a ciclos térmicos não otimizados, fissuras, empenamentos ou defeitos estruturais no objeto. Na Figura 13 está evidenciado o papel da otimização da construção e da subsequente sinterização, resultando num objeto apenas com defeitos estocásticos, comuns no fabrico aditivo [13, 19].

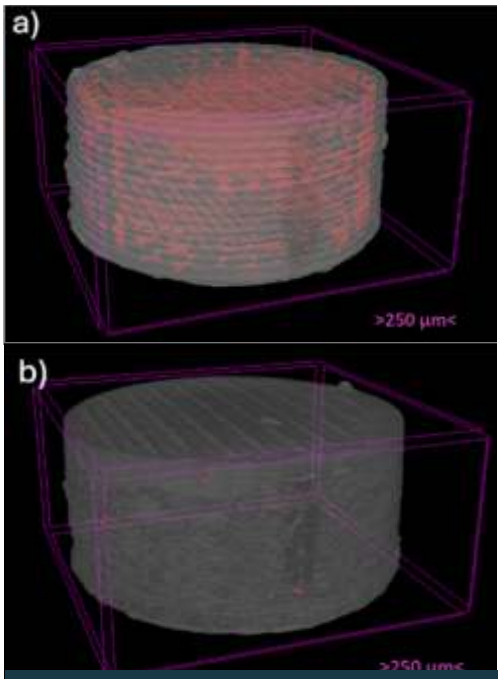


FIGURA 13
2D e 3D da diferença entre objeto 3D a) pré e b) pós-otimização.

3. CONCLUSÃO

O MEX pela sua universalidade demonstra ter competências de elevado interesse para aplicações na área da engenharia automóvel, biomédica, aeroespacial e afins, com materiais convencionais ou mesmo metamateriais. Apesar dos elevados esforços de investigação no último decénio*, continua a haver desafios que são necessários ultrapassar. De salientar a necessidade de uma análise eficiente dos defeitos, não só para a sua deteção e avaliação do seu efeito nas propriedades do objeto 3D, mas também como suporte necessário para uma simulação preditiva eficaz.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho é realizado no âmbito das "Agendas para a Inovação Empresarial" (Projeto no 49, de acrónimo "INOV.AM", com a referência PRR/49/INOV.AM/EE, código de operação 02/C05 i01.01/2022.PC644865234 00000004), apoiado pelo PRR Plano de Recuperação e Resiliência e pelos Fundos Europeus NextGeneration EU. http://www.recuperarportugal.gov.pt/e financiada por fundos nacionais através de FCT-Fundação para a Ciência e a Tecnologia, proje-tos UID/EMS/00285/2020, ARISE- LA/P/0112/2020.

*A colaboração entre instituições de pesquisa e empresas tecnológicas pode acelerar o desenvolvimento de novos processos e materiais. Isso acontece atualmente na Universidade de Coimbra que já realizou diversos projetos com empresas ex.: ADDPOWDER - New filaments based on metallic powders for additive manufacturing, Add.Additive - Add Additive Manufacturing to Portuguese Industry, @AM.PPT - Additive Manufacturing, 3DCOMPCER-Additive Manufacturing of Ceramic Matrix Composites for Mechanical Parts, INOV.AM - Inovação em Fabricação Aditiva. Esses projetos resultaram em inovações significa-tivas, combinando conhecimentos acadêmicos e industriais para superar desafios técnicos e explorar novas possibilidades. Tais parcerias também podem facilitar a transferência de tecnologia e a aplicação de novas descobertas em ambientes industriais.

REFERÊNCIAS

[1] N. Haghdadi, M. Laleh, M. Moyle, S. Primig, Additive manufacturing of steels: a review of achievements and challenges, J Mater Sci 56 (2021) 64-107. https://doi.org/10.1007/s10853-020-05109-0.

[2] C. Suwanpreecha, A. Manonukul, A Review on Material Extrusion Additive Manufacturing of Metal and How It Compares with Metal Injection Moulding, Metals (Basel) 12 (2022) 429. https://doi.org/10.3390/met12030429.

[3] C. Santos, D. Gatões, F. Cerejo, M.T. Vieira, Influence of Metallic Powder Characteristics on Extruded Feedstock Performance for Indirect Additive Manufacturing, Materials 14 (2021) 7136. https://doi.org/10.3390/ma14237136.

[4] F. Silva Cerejo, D. Gatões, T. Vieira, Optimization of Metallic Powder Filaments for Additive Manufacturing Extrusion (MEX), (2021). https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-168766/v1.

[5] P. Carreira, F. Cerejo, N. Alves, M.T. Vieira, In Search of the Optimal Conditions to Process Shape Memory Alloys (NiTi) Using Fused Filament Fabrication (FFF), Materials 2020, Vol. 13, Page 4718 13 (2020) 4718. https://doi.org/10.3390/MA13214718.

[6] A. Oleff, B. Küster, M. Stonis, L. Overmeyer, Process monitoring for material extrusion additive manufacturing: a state-of-the-art review, Progress in Additive Manufacturing 6 (2021) 705-730. https://doi.org/10.1007/s40964-021-00192-4.

[7] L.M. Cacho, M.A. Neto, D.M. Neto, M.T. Vieira, Coupling mcomputed tomography and multi-scale modelling to assess the mechanical performance of material extrusion metal components, Journal of Materials Research and Technology 30 (2024) 3238-3250. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.04.065.

[8] G. Oliveira, A. Senos, C. Fernandes, D. Figueiredo, T. Vieira, Material Extrusion to Manufacture Carbide-Based Advanced Cutting Tools, Materials 16 (2023) 6902. https://doi.org/10.3390/ma16216902.

[9] Y. Yang, C. Zhang, D. Wang, L. Nie, D. Wellmann, Y. Tian, Additive manufacturing of WC-Co hardmetals: a review, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 108 (2020) 1653-1673. https://doi.org/10.1007/s00170-020-05389-5.

[10] C. Suwanpreecha, A. Manonukul, A Review on Material Extrusion Additive Manufacturing of Metal and How It Compares with Metal Injection Moulding, Metals (Basel) 12 (2022) 429. https://doi.org/10.3390/met12030429.

[11] G. Oliveira, A. Senos, C. Fernandes, D. Figueiredo, T. Vieira, Material Extrusion to Manufacture Carbide-Based Advanced Cutting Tools, Materials 16 (2023) 6902. https://doi.org/10.3390/ma16216902.

[12] L.M. da Silva, S.G.S. Alcalá, T.M.G. de A. Barbosa, R. Araújo, Object and defect detection in additive manufacturing using deep learning algorithms, Production Engineering (2024). https://doi.org/10.1007/s11740-024-01278-y.

[13] S. Hosseinimehr, A. Mohammadpanah, M.J. Benoit, D.F. Ester, A. Zang, M. Martinez, X. Jin, A.T. Clare, Defect evolution and mitigation in metal extrusion additive manufacturing: From deposition to sintering, J Mater Process Technol 329 (2024) 118457. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2024.118457.

[14] D.G. Luchinsky, V. Hafiychuck, K.R. Wheeler, S. Biswas, C.E. Roberts, I.M. Hanson, T.J. Prater, P.V.E. McClintock, Multi-Scale Modelling of the Bound Metal Deposition Manufacturing of Ti6Al4V, Thermo 2 (2022) 116-148. https://doi.org/10.3390/thermo2030011.

[15] M.Q. Shaikh, P. Singh, K.H. Kate, M. Freese, S. V. Atre, Finite Element-Based Simulation of Metal Fused Filament Fabrication Process: Distortion Prediction and Experimental Verification, Journal of Materials Engineering and Performance 30 (2021) 5135-5149. https://doi.org/10.1007/s11665-021-05733-0.

[16] CIMQUEST, Desktop Metal live sinter, (n.d.). https://cimquest-inc.com/desktop-metal-live-sinter/ (accessed May 28, 2024).

[17] L. Cacho, B. Alves, A. Ramalho, A. Neto, T. Vieira, G. Rodrigues, Micromechanical Modeling of the Material Impact in the Feedstock Filament Properties for Indirect Additive Manufacturing (MEX), in: Materiais 2022, MDPI, Basel Switzerland, 2022: p. 38. https://doi.org/10.3390/materproc2022008038.

[18] L.M. Cacho, M.A. Neto, D.M. Neto, M.T. Vieira, Coupling mcomputed tomography and multi-scale modelling to assess the mechanical performance of material extrusion metal components, Journal of Materials Research and Technology 30 (2024) 3238-3250. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.04.065.

[19] D. Gatões, Smart Control of Defects in Additive Manufacturing 3D objects Function of Application, PhD, University of Coimbra, 2023.

[**20]** F.M. Barreiros, M.T. Vieira, PIM of non-conventional particles, Ceram Int 32 (2006) 297-302. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2005.03.006.

[21] P. Carreira, D. Gatões, N. Alves, A.S. Ramos, M.T. Vieira, Searching New Solutions for NiTi Sensors through Indirect Additive Manufacturing, Materials 2022, Vol. 15, Page 5007 15 (2022) 5007. https://doi.org/10.3390/MA15145007.

[22] R. Côté, V. Demers, N.R. Demarquette, S. Charlon, J. Soulestin, A strategy to eliminate interbead defects and improve dimensional accuracy in material extrusion 3D printing of highly filled polymer, Addit Manuf 68 (2023) 103509. https://doi.org/10.1016/j.addma.2023.103509.

SPM
SOCIEDADE
PORTUGUESA de
MATERIAIS



FABRICO ADITIVO PARA COMPONENTES METÁLICOS DE GRANDE DIMENSÃO E DESEMPENHO

Vítor Gomes[a]*, Rui Amaral[b], Omid Emadinia[b]

a FEUP, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Rua Dr. Roberto Frias, s/n, 4200-465, Porto, Portugal

b INEGI, Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial, Rua Doutor Roberto Frias, 400, 4200-465, Porto, Portugal

* Autor correspondente: vtgomes@fe.up.pt

O fabrico aditivo é um método de produção revolucionário para novos designs que tem demonstrado maior eficácia face às metodologias convencionais no que diz respeito aos tempos de produção para a obtenção de componentes de geometria complexa. Desde a sua invenção, a tecnologia tem evoluído com o objetivo de melhorar o seu processo e consequentemente as características dos produtos finais. Para cada aplicação e materiais, diferentes tecnologias e métodos são utilizados. No que diz respeito a componentes metálicos, o Laser Powder Bed Fusion (LPBF) e o Direct Energy Deposition, (DED) podem ser utilizados, porém, e independentemente do processo de fabrico aditivo, quando as dimensões dos componentes são bastante grandes, metodologias mais eficazes devem ser consideradas de modo a ultrapassar as desvantagens associadas ao fabrico aditivo na produção de componentes de grande dimensão. Assim, tecnologias DED podem ser integradas num processo de fabrico híbrido para a produção eficiente de componentes metálicos de grande dimensão e desempenho. O processo de fabrico híbrido (aditivo + convencional, ou convencional + aditivo) apresenta-se assim, como uma alternativa viável, permitindo ainda obter diferentes produtos em tempo útil.

1. INTRODUÇÃO

O fabrico aditivo é um método de produção de conceção revolucionário para novos designs. A sua aplicação face às metodologias convencionais tem demonstrado a diminuição dos tempos de produção necessários para a obtenção do componente com a mesma funcionalidade. Esta tecnologia nasceu com a aplicação em material plástico no início da década de 80 e continuou com a utilização de ligante polimérico para ligação de pós cerâmicos ou metálicos para conferir a geometria pretendida. Esta tecnologia foi comercializada no fim da década de 80, consequentemente o fabrico aditivo metálico apareceu no mercado por volta dos anos 90, a partir da marca EOS, utilizando tecnologia sinterização por laser, ou seja, *Direct Metal Laser Sintering* (DMLS) (AMFG, 2019), o que permitiu não utilizar ligante. Desde aí, os desenvolvimentos e investigações em torno desta tecnologia têm centrado o seu foco na melhoria do processo e na maximização das propriedades mecânicas. As tecnologias de fabrico aditivo para produção de componentes de material metálico, nomeadamente o *Laser Powder Bed Fusion* (LPBF) e o *Direct Energy Deposition*, (DED), têm mostrado boa aplicabilidade dentro das suas limitações em diversos setores, tanto para a produção como na reparação, ou mesmo no redesign de componentes.

Apesar da superação dos diferentes desafios que as tecnologias de fabrico aditivo têm ultrapassado, o tempo de processamento e consequentemente os custos de produção aumentam significativamente à medida que o tamanho da peça aumenta. De forma a ultrapassar esta limitação, novas estratégias de fabrico, como o caso do fabrico híbrido têm sido recentemente consideradas. Processos de fabrico híbrido usam processos de conformação tradicionais combinados parcialmente com tecnologias de fabrico aditivo, de forma a aproveitar as vantagens individuais de cada processo na melhoria das propriedades dos componentes.

O presente documento pretende dar ao leitor uma visão geral das potencialidades do fabrico

aditivo e da sua combinação com as metodologias de fabrico convencional (fabrico híbrido) para a produção de componentes metálicos de grande dimensão. O documento apresenta ainda a comparação de dois tipos de tecnologias de fabrico aditivo utilizadas no fabrico de componentes metálicos.

2. TECNOLOGIAS DE FABRICO ADITIVO PARA MATERIAL METÁLICO

Após o aparecimento do fabrico aditivo metálico por volta da década de 90, a partir da tecnologia sinterização por laser, ou seja, *Direct Metal Laser Sintering* (DMLS) (AMFG, 2019), as investigações e desenvolvimentos seguintes incidiram no melhoramento desta tecnologia, com o objetivo de se obter peças com uma densidade material completa (o que não tinham conseguido até à data), e melhorar outros parâmetros do processo a fim de maximizar o aproveitamento da potência do laser, etc. Além disso, a produção perfeita do componente deve ser estudada para o tipo de material que o constitui, ou seja, as características de reflecção e absorção de energia emitida pelo laser devem ser consideradas aquando da seleção de material para o componente. Por exemplo, existem metais que refletem o laser ou têm baixa capacidade de absorção de energia tal como o cobre, o alumínio, ou metais precisos. Para ultrapassar esta limitação, a aplicação do laser verde pode ser considerada ao invés da solução mais convencional, o laser vermelho.

Durante o processo de fabrico aditivo, o acréscimo de material pode ser feito por consolidação de conjunto de pó que já existe sobre uma camada uniforme (seja por gotas de um ligante polimérico ou por feixe de laser ou feixe de eletrões) ou por deposição de pó ou fio que se funde por laser ou arco.

A primeira tecnologia denomina-se de *Powder Bed* (ver o exemplo de um sistema de Laser *Powder Bed Fusion* (LPBF) na Figura 1) e tem vantagem na produção de geometrias muito complexas e de geometrias *Near-Net-Shape*, o que resulta no baixo rácio de material consumido durante a impressão e material removido durante o acabamento. Porém, esta tecnologia apresenta limitações ao nível do processo de fabrico e dimensão total do substrato. Utilizando a tecnologia *LPBF*, até à atualidade, apenas é possível a impressão de volumes de 500 x 280 x 850 mm³ e 450 x 450 x 400 mm³ (Nikon SLM Solutions).

A impressão tem ainda a limitação do processo, uma vez que as peças são impressas sobre um plano (ver Figura 2a), o que não possibilita a



FIGURA 1
Máquina Laser Powder Bed fusion (Selective Laser Melting).

impressão sobre superfícies contornadas ou superfícies que apresentem topografia. A Figura 2b ilustra a microestrutura de uma liga metálica impressa por técnica LPBF, observando-se um aspeto de escamas que é uma característica observada em secções transversais obtidas por componentes produzidos em material metálico, impressos linha a linha (mesma camada) e camada a camada.

Do outro lado existe o fabrico aditivo por

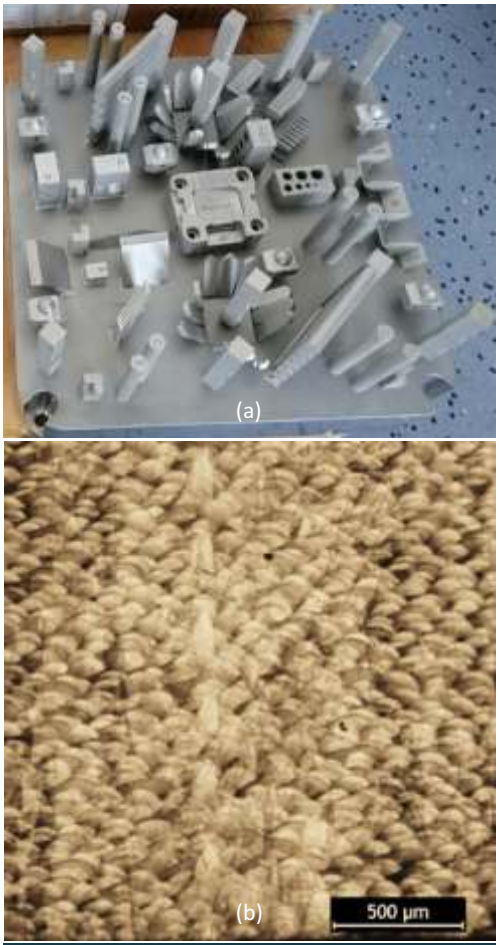


FIGURA 2
(a) Conjunto de peças de liga AISI 316L impressas pela tecnologia SLM, (b) Microestrutura da liga AISI 316L impressa (secção transversal).

deposição que se aplica tanto na produção das peças/componentes, como na sua reparação. Esta técnica é utilizada essencialmente quando os componentes a produzir ou a reparar têm grandes dimensões. Esta tecnologia dispõe de integração de tecnologia robótica para responder a este requisito, embora também existam modelos equipados com câmaras e CNC de 5 eixos. Nesta tecnologia, o material de adição, seja pó ou fio, funde-se na superfície do substrato em harmonia com os movimentos do *nozzle* e do posicionador.

Historicamente, a tecnologia DED que utiliza pó que originou os revestimentos é mais antiga que a tecnologia que usa fio, o que fornece a vantagem de existência de uma maior diversidade de materiais em pó no mercado. A Figura 3 mostra dois sistemas desta técnica de deposição robotizada. A Figura 3a apresenta o equipamento *Direct Energy Deposition*, DED, que usa material de adição em pó enquanto a Figura 3b (mesma tecnologia), utiliza como material de adição, fio.

Existem peças de grande dimensão em que os materiais bases não existem em formato de pó ou fio para adição, como por exemplo, peças compostas por ligas, ferro fundido, camada cementada, etc. Desse modo é necessário que a secção a ser reparada exiba o mesmo ou semelhante comportamento mecânico (resistência e rigidez) e densidade do material base. Para ultrapassar este requisito, a tecnologia de deposição por pó é mais vantajosa uma vez que existe no mercado uma vasta gama de pós que podem ser testados para esse fim. O uso da tecnologia de pó possibilita a produção *Functionally Graded Materials*, ou seja, permite a criação de um gradiente de composição química desde o substrato até à camada final, permitindo a otimização de várias características, tais como a rigidez variável ao longo da secção, maior ductilidade no núcleo combinado com uma maior resistência ao desgaste na superfície, ou a produção de compósitos de matriz metálica com variação da concentração do reforço ao longo da secção impressa.

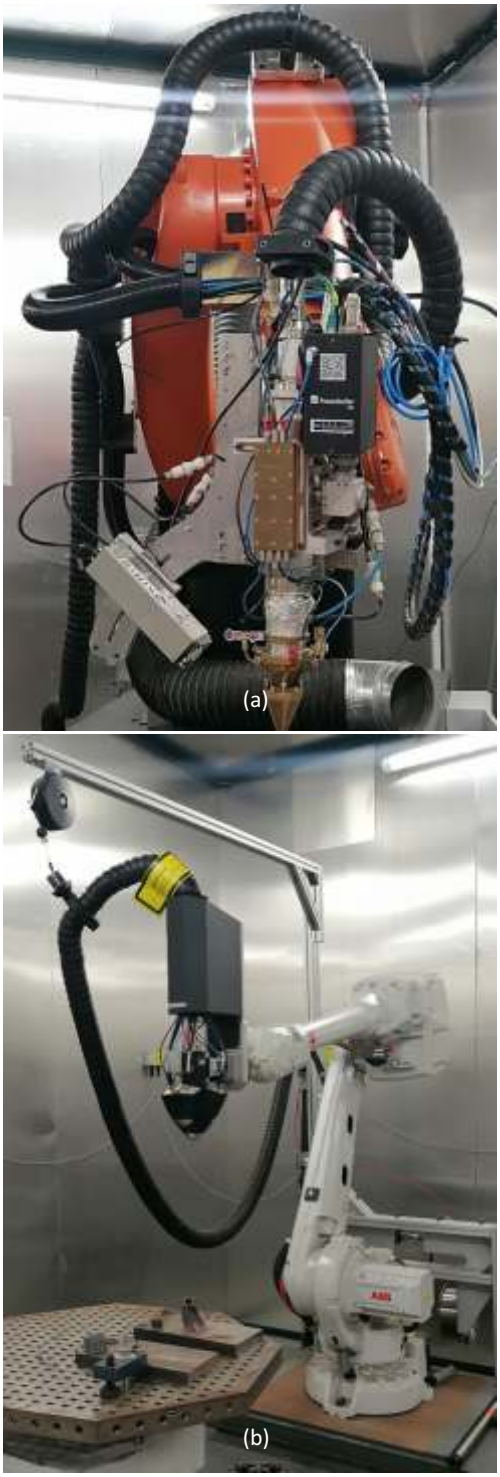


FIGURA 3
Robôs equipados com tecnologia de fabrico aditivo por deposição direta que utilizam como material de adição: (a) pó e (b) fio.

3. APLICAÇÕES: SUBSTITUIÇÃO, REPARAÇÃO E/OU REDESIGN DE COMPONENTES

Pelas características do fabrico aditivo, este método pode ser aplicado na produção de componentes de maior complexidade geométrica e funcional, ao mesmo tempo que facilita a conceção de novos designs, reduz os custos de produção (por exemplo associados à utilização de ferramentas) e permite a produção de componentes *just-in-time* o que consequentemente resulta na redução de custos de associados ao armazenamento de grandes quantidades de peças/componentes, etc. Além disso, uma vez que a tecnologia de fabrico aditivo metálico utiliza uma diversidade de ligas metálicas de baixo peso, tais como ligas de alumínio e ligas de titânio, e também metais duros e pesados, tal como o cobalto-crómio, esta tecnologia aditiva pode ser eficientemente aplicável em diversos setores, tais como o setor aeronáutico,

aeroespacial, automóvel, ferroviário, defesa, medicina, e energia, etc.

No setor ferroviário, várias entidades já têm introduzido o processo de fabrico aditivo na produção de peças para substituição de componentes convencionais. Estas mudanças têm mostrado muitas vantagens para as entidades do setor devido à sua rapidez e baixo custo de produção. Além disso, a introdução desta tecnologia tem permitido a redução dos tempos de paragem e o aumento da eficiência na gestão de stock de peças sobressalentes. Alguns exemplos da utilização da tecnologia de fabrico aditivo são a produção de tampões metálicos para a caixa de eixos dos rolamentos dos rodados (ver Figura 4 (AMFG, 2019)), o roll stop (ver Figura 5 (VoxelMatters, 2020) e suporte do disco de freio (ver Figura 6 (Magazine, 2020) (VoxelMatters, 2019)).



FIGURA 4
Tampões para caixa de eixo produzido por fabrico aditivo (componente em cima), com posterior acabamento por maquinagem (componente em baixo) (AMFG, 2019).

Em operação ou mesmo durante o processo de montagem, componentes do material circulante como rodados, assentos de engrenagem e veios podem ser danificados, causando defeitos superficiais como por exemplo, arranhões ou mossas, entre outros (Wu, 2023) (G. Piscopo, 2022). Estes defeitos superficiais reduzem significativamente a resistência do componente podendo causar a sua falha prematura. De modo a evitar tais ocorrências e evitar a substituição de um componente de grande dimensão, o processo de reparação da superfície por processo de fabrico aditivo, é o processo economicamente mais viável.
Umas das tecnologias de fabrico aditivo já estudadas para a reparação de material circulante ferroviário e também pelas vantagens



FIGURA 5
Roll stops para veículos ferroviários produzido por fabrico aditivo com acabamento por fresagem (VoxelMatters, 2020).

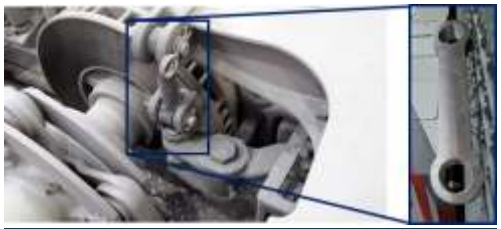


FIGURA 6
Suporte de suspensão de uma disco de freio de um bogie ferroviário original (Magazine, 2020) e o mesmo tipo de componente produzido por fabrico aditivo (VoxelMatters, 2019)

já mencionadas no início deste artigo é o DED (PiscopoG., 2022) (Lewis S. R., 2017) (Hua L., 2022). O DED por pó foi aplicado na reparação de diferentes partes de um rodado ferroviário. No primeiro caso, ilustrado na Figura 7, o DED foi utilizado na reparação do veio de um rodado, enquanto no segundo caso, ilustrado pela Figura 8, o DED permitiu a reparação do perfil da flange do rodado. Em ambos os casos, a resistência dos componentes foi melhorada comparada com o material danificado, não tendo sido observadas diferenças significativas ao nível de resistência quando comparado com o mesmo componente não danificado.
Além do processo de reparação de componentes danificados, o fabrico aditivo também tem sido utilizado como tecnologia para o desenvolvimento de componentes de material circulante

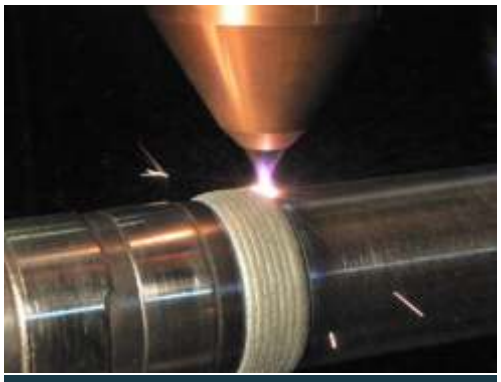


FIGURA 7
Reparação de um veio de um rodado utilizando tecnologia DED (TWI, 2021).

ferroviário mais leve. Esta tecnologia pode ser combinada com as técnicas de otimização topológica para otimização do peso do componente sem que a sua integridade estrutural seja afetada, podendo ainda aumentar a sua resistência específica (F. Ren, 2011) (F. Scalzo, 2021) (Guo, 2022) (J.C. Najmon, 2019) (T. Anton, 2020).



FIGURA 8
Reparação do perfil da flange de um rodado ferroviário utilizando tecnologia DED (Tech, 2021).

Alguns componentes com grande importância estrutural têm sido investigados e utilizados a partir de uma análise combinada entre a tecnologia de fabrico aditivo com otimização topológica, sendo alguns exemplos os suporte de fixação das barras *anti-roll*, o apoio do amortecedor vertical secundário, do amortecedor *anti-yaw*, componentes de paragem laterais, *traction rod* e o *knuckle* do acoplador (Altair, 2022) (Hoosain, 2020).

Estas vantagens apresentadas pela tecnologia de *Laser Cladding: Direct Energy Deposition* face ao *powder bed fusion*, impulsionam a aplicação desta tecnologia para o fabrico aditivo híbrido, quando a produção de peças de grandes dimensões e/ou sua reparação é necessária.

4. FABRICO HÍBRIDO: SOLUÇÃO INOVADORA

A produção de componentes de alto desempenho, considerando resistência mecânica e desempenho ambiental, é de elevada importância para a indústria de transportes (Kubatzke, 2021), onde tipicamente, processos de forjamento são utilizados no seu fabrico. Um exemplo são os componentes estruturais para o setor ferroviário, frequentemente caracterizados por uma distinta fiabilidade e capacidade de suportar cargas mais elevadas. No entanto, as qualidades excecionais, por exemplo de uma peça forjada podem ser ofuscadas por enormes custos de maquinagem (processo longo e com baixa eficiência de recursos).

Na procura contínua pela melhoria da eficiência, considerando a redução de custos e prazos de entrega, bem como a tentativa de redução do desperdício de material na produção de componentes, são utilizados materiais de alto desempenho, o que pode aumentar a complexidade dos processos (Blakey-Milner, 2021).

Apesar dos desafios, esforços significativos têm sido realizados para aplicar novas tecnologias, como o caso do fabrico aditivo, que pode conduzir a um processo de produção mais eficiente em termos de recursos do que os métodos de produção convencionais (Iyibilgin, 2021). Infelizmente, no fabrico aditivo, o tempo de processamento e, como resultado, os custos de produção correspondentes, aumentam significativamente à medida que o tamanho da peça aumenta, sem mencionar o preço das matérias-primas (Nie, 2019). Portanto, novas estratégias de fabrico, como o fabrico híbrido têm sido consideradas. Processos de fabrico híbrido utilizam processos de conformação tradicionais combinados parcialmente com tecnologias de fabrico aditivo, já que as vantagens individuais de cada um podem ser usadas para melhorar as propriedades dos componentes em comparação com a produção convencional, permitindo compensar a falta de eficiência de recursos e flexibilidade.

A tecnologia híbrida permite auxiliar na produção de peças complexas e de grande dimensão quando é necessário adicionar uma característica (estrutural ou funcional) a uma pré-forma, ou gerar uma pré-forma por fabrico aditivo que será posteriormente submetida a um processo convencional. Independentemente da ordem de operação, o fabrico aditivo pode ser combinado com maquinagem/ fresagem ou forjamento/fundição. Um exemplo de aplicabilidade da primeira abordagem é a produção de canais conformais em moldes, como ilustrada na Figura 9, para aumento da eficácia de arrefecimento do processo. Referente à segunda abordagem, esta pode ser utilizado para reduzir/ eliminar os suportes sujeitos ao *overhanging*, que é essencial para fabricar uma peça em altura.

No caso particular de componentes obtidos por forjamento combinados com fabrico aditivo, estes podem também ter os dois caminhos de produção já descritos: i) processo de fabrico aditivo usado para adicionar uma característica a uma pré-forma de uma peça forjada ou; ii) o processo de fabrico aditivo poder gerar uma pré-forma que será posteriormente submetida a uma etapa de forjamento. O primeiro caso permite o fabrico de componentes complexos a partir de uma geometria forjada base, a manu-

tenção e reparação de peças, ou até mesmo proporcionando propriedades locais aperfeiçoadas. Na segunda opção, o uso de forjamento como um pós-processo para a pré-forma de fabrico aditivo (ver Figura 10) poderia reduzir a porosidade do material e melhorar o desempenho mecânico geral, além de aumentar a qualidade do acabamento superficial.

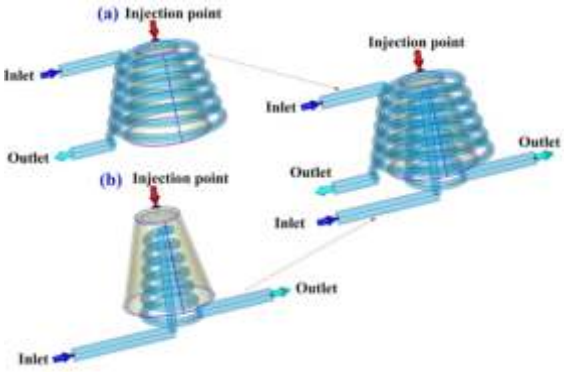


FIGURA 9
Esquema ilustrativo de um sistema de arrefecimento na moldagem que se realiza por LPBF (Kuo, 2021).

Com base no estado-da-arte, é claro que combinar forjamento com fabrico aditivo pode proporcionar uma economia de custos e melhorar o desempenho dos componentes. A combinação específica de forjamento de metais e deposição direta de energia usando materiais dissimilares, tem grande potencial para oferecer um vasto portfólio de produtos e encurtar os ciclos de mudança.

5. CONCLUSÃO

O fabrico aditivo ou também conhecido como impressão 3D, revolucionou a forma como os componentes são projetados e fabricados. Esta tecnologia oferece várias vantagens face às tecnologias de fabrico convencionais, nomeadamente quando se trata da produção de componentes de geometria complexa/personalizada e redução de desperdício de material. Atualmente para a impressão de componentes metálicos duas tecnologias podem ser utilizadas: o Laser *Powder Bed Fusion* (LPBF) e o *Direct Energy Deposition*, DED. A tecnologia *Laser Powder Bed Fusion* (LPBF) pode ser utilizado eficientemente na produção de componentes com geometrias muito complexas e *Near-Net-Shape*, mas apresenta atualmente limitações intrínsecas ao processo, e ao nível do volume de impressão. A tecnologia *Direct Energy Deposition*, (DED), quer por pó ou fio pode ser aplicada eficientemente tanto na produção como na reparação de componentes de grandes dimensões, muito devido à integração de tecnologia robótica. Componentes ferroviários reparados por DED mostraram melhoramentos de resistência face ao componente danificado e níveis de resistência semelhantes com o mesmo componente não danificado.

Apesar da boa aplicabilidade do fabrico aditivo por DED na produção de peças de grandes dimensões e/ou sua reparação, a sua aplicabilidade é menos eficiente, especialmente na produção de componentes de grande dimensão e elevado desempenho. Nestas condições é recomendado a produção de componentes por fabrico híbrido, combinando as vantagens do fabrico aditivo com as vantagens das técnicas de fabrico convencionais, por exemplo forjamento, maquinagem, fundição, etc. No caso específico do forjamento, a combinação de forjamento de metais e adição materiais dissimilares, permite obter uma vasta gama de produtos, o que só é possível com a utilização de fabrico híbrido.

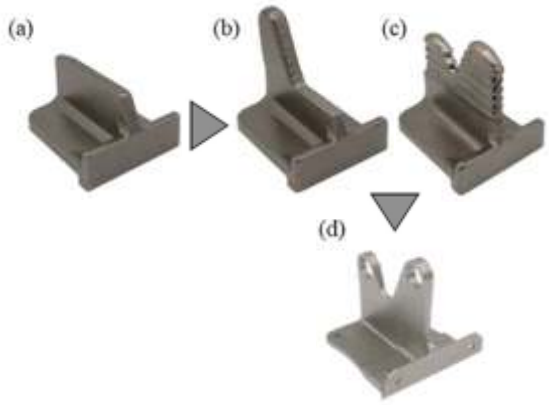


FIGURA 10
Peça obtida por fabrico híbrido seguindo a abordagem 1 (Peça forjada (a) seguido de fabrico aditivo (b) e (c) com a acabamento por maquinagem (d) (Frank Meiners, 2020).

REFERÊNCIAS

Altair. (2022). *Using topology optimization with solidthinking inspire for improved casted rail components.* Retrieved abril 20, 2023, from https://www.altair.com/customer-story/Alstom/simulation-driven-design-approach

AMFG. (2019, outubro 15). *Application Spotlight: 3D Printing in the Rail Industry.* Retrieved abril 1, 2022, from https://amfg.ai/2019/10/15/application-spotlight-3d-printing-in-the-rail-industry

AMFG. (2019, fevereiro 19). Metal 3D Printing: *Where Are We Today?* Retrieved outubro 2023, from https://amfg.ai/2019/02/19/metal-3d-printing-where-are-we-today/

Blakey-Milner, B. P. (2021). Metal additive manufacturing in aerospace: A review. *Materials & Design, 209*, 110008. doi:https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.110008

F. Ren, L. W. (2011). Low frequency and broadband vibration attenuation of a novel lightweight bidirectional re-entrant lattice metamaterial. *Mater. Lett* , 299, 130133.

F. Scalzo, G. T. (2021). Experimental study on the high-damping properties of metallic lattice structures obtained from *SLM. Precis. Eng,* 71, 63-77.

Frank Meiners, J. I.-S. (2020). New hybrid manufacturing routes combining forging and additive manufacturing to efficiently produce high performance components from Ti-6Al-4V. *Procedia Manufacturing,* 47, 261-267.

G. Piscopo, L. I. (2022). Current research and industrial application of laser powder directed energy deposition. *Int. J. Adv. Manuf. Technol,* 119(11), 6893-6917.

Guo, F. (2022). *Structural design and structural integrity assessment of additive manufacturing aluminum bogie for high-speed maglev train.* Southwest Jiaotong University .

H.B. Zhu, Y. L. (2019). Current research status of metal prototyping manufacturing (3D-printing) technology application in rail transit equipment, Modern. *Urban Transit,* 10, 77-81.

Hoosain, S. E. (2020). Additive manufacturing case study in the railway industry. *Proceedings of the Rapid Product Development Association of South Africa (RAPDASA).*

Hua L., Z. R. (2022). Damage and Fatigue Life Evaluation for Laser Cladding Remanufactured Wheel. *Advances in Materials Science and Engineering,* 7, 126-136. Retrieved from https://doi.org/10.1155/2022/2060564

Iyibilgin, O. a. (2021). Additive Manufacturing Technologies and Its Future in Industrial Applications. *International Journal of Integrated Engineering,* 13(7), 245-257. Retrieved from https://doi.org/10.30880/ijie.2021.13.07.028

J.C. Najmon, S. R. (2019). Review of additive manufacturing technologies and applications in the aerospace industry. *Additive Manufacturing for the Aerospace Industry,* 7-31.

Kubatzke, K. (2021, setembro). *How forging can extend the service life of aerospace components", Aerospace Manufacturing and Design.* Retrieved março 4, 2022, from https://www.aerospacemanufacturinganddesign.com/article/forging-vs-casting-september-2021

Kuo, C. C. (2021). Rapid development of an injection mold with high cooling performance using molding simulation and rapid tooling technology. *Micromachines,* 12(3), 311. doi:10.3390/mi12030311

Lewis S. R., L. R.-S. (2017). Full-scale testing of laser clad railway track. Case study-Testing for wear,bend fatigue and insulated block joint lipping integrity. *Wear,* 376-377, Part B, 1930-1937. Retrieved from https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.02.023

M. Soodi, M. B. (2012). Fatigue strength properties in rail axles refurbished by laser cladding. CORE 2012: *conference on railway engineering.* Queensland, Austrilia.

Magazine, T. (2020, December 22). *Additive is a lighthouse: Siemens Mobility on the growing importance of 3D printing in the rail sector.* Retrieved October 2023, from 3D Printing & Additive Manufacturing Intelligence: https://www.tctmagazine.com/additive-manufacturing-3d-printing-news/siemens-mobility-growing-importance-3d-printing-rail/

Nie, Z. S. (2019). Optimization of Part Consolidation for Minimum Production Costs and Time Using Additive Manufacturing. *Journal of Mechanical Design*, 142(7). Retrieved from https://doi.org/10.1115/1.4045106

Nikon SLM Solutions. (n.d.). *SLM 800*. Retrieved January 2024, from https://www.slm-solutions.com/products-and-solutions/machines/slm-800/

P. Xiao, J. W. (2022). Microstructure of EA4T axle steel repaired by laser-cladding and evaluation of strength. *Mater. Rep.,* 7, 1-16.

PiscopoG., I. (2022). Current research and industrial application of laser powder directed energy deposition. *Int.J.Adv.Manuf.Technol.*, 119(11), 6893-6917. Retrieved from https://doi.org/10.1007/s00170-021-08596-w

Soodi, M. (2013). Investigation of laser deposited wear resistant coatings on railway axle steels. *RMIT University.*

T. Anton, B. W. (2020). *Feasibility study demonstrates potential of industrial 3D printing in the rail industry, Rail Vehicle Systems*. Retrieved abril 15, 2022, from https://rail.knorr-bremse.com/en/de/stories/technical-articles/content-page-etr-1.json

T. Roy, A. P. (2020). Residual stress in laser cladded heavy-haul rails investigated by neutron diffraction. *J. Mater. Process. Tech.*, 278, 116511.

Tech, W. L. (2021, março). *Wheel Tread And Rim*. Retrieved setembro 2023, from https://www.lasercladdingtech.com/wheel-tread-and-rim_p84.html

TWI. (2021, julho 1). *Refurbishment of Railway Axles (Relase Project)*. Retrieved setembro 2023, from https://www.lasercladdingtech.com/wheel-tread-and-rim_p84.html

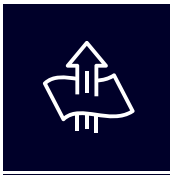
VoxelMatters. (2019, dezembro 5). *First 3D printed safety-relevant part approved in the railway sector.* Retrieved outubro 2023, from https://www.voxelmatters.com/first-3d-printed-safety-part-approved-railway/

VoxelMatters. (2020, outubro 14). *Large rail parts produced in half the time, with 30% cost reduction*. Retrieved junho 2023, from https://www.voxelmatters.com/large-rail-secondary-roll-stop-produced-in-half-the-time/

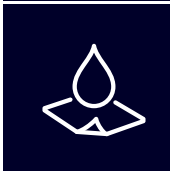
Wu, Z. W. (2023). Structural integrity issues of additively manufactured railway components: Progress and challenges. *Engineering Failure Analysis*, 107265.

DIVISÕES TÉCNICAS

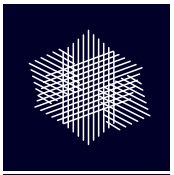
Representam importantes Áreas do conhecimento e desenvolvimento em Ciência e Tecnologia de Materiais, proporcionando aos membros ações no seio das várias comunidades profissionais específicas, reuniões técnico-científicas e recursos, oportunidades de educação, de participação e formação de redes e plataformas e divulgação nas respetivas áreas do conhecimento.



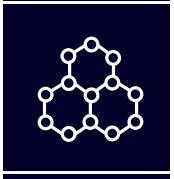
CORROSÃO E PROTEÇÃO DE MATERIAIS, *coordenada por Teresa Diamantino (LNEG) e Zita Lourenço (Zetacorr), contempla conhecimento e atividade no domínio da Corrosão e Proteção de Materiais*



ENGENHARIA DE SUPERFÍCIES, *coordenada por Albano Cavaleiro (FCTUC) e Ricardo Alexandre (TEandM) agrega: Eletroquímica de Materiais, Tratamentos Térmicos e Engenharia de Superfícies, Tribologia e áreas afins*



MATERIAIS ESTRUTURAIS, *coordenada por Jorge Lino e Manuel Vieira (ambos da FEUP): de âmbito muito vasto, inclui Materiais Metálicos, Materiais Cerâmicos, Materiais Compósitos e Fractura, entre outros*



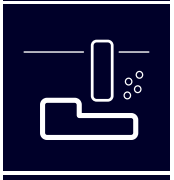
MATERIAIS FUNCIONAIS, *coordenada por Luís Pereira (FCT/UNL), Maria Helena Fernandes (U Aveiro) e Maria Ascensão Lopes (FEUP), abrange áreas de Nano-tecnologias e Biomateriais, Materiais para a Eletrónica, Optoeletrónica e Dispositivos Médicos*



MATERIAIS PARA A ENERGIA, *coordenada por Filipe Neves (LNEG) e Pedro Salomé (INL) agrega: Materiais a serem usados em aplicações energéticas de conversão, armazenamento e para o aumento de eficiência energética de vários processos.*



POLÍMEROS E COMPÓSITOS, *coordenada por Jorge Coelho (FCTUC), A. Torres Marques (FEUP), J. C. Bordado e A. Correia Diogo (IST), agrega: termoplásticos, elastómeros, termoendurecíveis, polímeros funcionais e respectivos sistemas compósitos.*



TECNOLOGIA E PROCESSAMENTO DE MATERIAIS, *tem como principal objetivo contribuir para a dinamização da investigação e disseminação em tecnologias de produção de componentes mecânicos num enquadramento de constante evolução dos materiais e consideração pela sustentabilidade ambiental e social. A divisão é atualmente coordenada por Abílio de Jesus (FEUP), Hélder Puga (UM) e Pedro Rosa (IST)*



J-SPM, *integra os sócios da SPM com menos de 35 anos e tem como principal objetivo representar os pontos de vista, as necessidades e expectativas dos sócios jovens*



COMUNICAÇÃOO E DIVULGAÇÃO, *criada em Julho de 2019, pretende ser o veículo da SPM por excelência, através do qual se dará mais voz à área de Materiais. Coordenada por Paula Vilarinho (U Aveiro), conta com a colaboração de Manuela Oliveira e Joana Sousa*



MATERIAIS E PATRIMÓNIO CULTURAL, *criada na Assembleia Geral da SPM de Dezembro de 2022, tendo como objetivo ser um fórum dinâmico na promoção e divulgação do conhecimento na área dos materiais do património cultural. Através da dinamização de ações para o público em geral e especializado, assim como para empresas que operam no sector e instituições de ensino que oferecem formação na área, seja através de palestras, workshops, conferências, exposições ou notícias, pretende-se incentivar novos estudos e uma melhor compreensão do papel desempenhado pelos materiais no património cultural. Coordenação: João Pedro Veiga e Márcia Vilarigues*

PERITOS

A SPM disponibiliza no seu site uma lista de peritos que pode consultar se necessitar de apoio, colaboração ou serviço.

JUNTE-SE A ESTA LISTA!

- **Abílio de Jesus**
- **Abílio Manuel Pereira da Silva**
- **Adriana Cavaco**
- **Aida Beatriz Vieira Moreira**
- **Albano Cavaleiro**
- **Alice Tavares**
- **André Ferreira Costa Vieira**
- **Andrei Kholkin**
- **Andreia Ruivo**
- **Andreia F. Sousa**
- **Ana Cabral**
- **Ana Rosanete Lourenço Reis**
- **Ana Sofia Figueira Ramos**
- **António José Vilela Pontes**
- **António Paulo Cerqueira Duarte**
- **António Torres Marques**
- **Artur Jorge dos Santos Mateus**
- **Bruno Araújo de Almeida**
- **Carlos Manuel da Fonseca Dias**
- **Carlos Miguel Marto**
- **Celeste Pereira**
- **Clara Rodrigues Pereira**
- **Cláudia Lopes**
- **Cláudia Ranito**
- **Edmundo Manuel Tavares Marques**
- **Fernando de Almeida Costa Oliveira**
- **Frederico Calheiros Maia**
- **Georgina Miranda**
- **Guilherme Nuno Carvalho**
- **Hugo Águas**
- **Inês Rondão**
- **João Alexandre Costa Gomes da Peixinha**
- **João Carlos Velosa Pereira**
- **João C.C. Abrantes**
- **João Pedro Nunes Pereira**
- **João Pedro Oliveira**
- **João Salvador Fernandes**
- **Joana Filipa dos Santos Teixeira**
- **Jingzhong Xiao**
- **José Cruz Oliveira**
- **José David Castro Castro**
- **José Luís de Sousa Amorim do Vale Quaresma**
- **José Manuel Antelo**
- **Jorge Fernando Jordão Coelho**
- **Jorge Lino Alves**
- **José Manuel Monteiro da Costa**
- **José Ramiro Afonso Fernandes**
- **Luís Gil**
- **Luís Manuel Lopes de Carvalho**
- **Maria de Fátima Reis Vaz**
- **Maria do Carmo Henriques Lança**
- **Mariana Sofia Peixoto Fernandes**
- **Manuel João Mendes**
- **Martinho Oliveira**
- **Nuno Ferreira**
- **Paulo Mourão**
- **Pedro A.R. Rosa**
- **Pedro Barquinha**
- **Pedro Salomé**
- **Penka Girginova**
- **Regina Santos**
- **Rosa Marat Mendes**
- **Sónia Simões**
- **Susana França de Sá**
- **Teresa Leonor Ribeiro Cardoso Martins Morgado**
- **Teresa Monteiro**
- **Vanessa Cardoso**
- **Virgínia Infante**
- **Vitor Sencadas**
- **Zohra Benzarti**

Para mais informações consulte o nosso site:
http://spmateriais.pt/spm/peritos-spm/

SÓCIOS COLETIVOS



































































































SPM
SOCIEDADE PORTUGUESA de MATERIAIS

CONTACTOS

www.spmateriais.pt
comunicacao@spmateriais.pt
965 756 172