

## **Impressão 3D de Alimentos: Uma revisão sobre a história, funcionalidade e desafios no desenvolvimento de produtos**

**3D food printing: A review of history, functionality and challenges in product development**

**Impresión 3D de alimentos: Una revisión de la historia, la funcionalidad y los desafíos en el desarrollo de productos**

Recebido: 16/12/2024 | Revisado: 27/12/2024 | Aceitado: 28/12/2024 | Publicado: 03/01/2025

### **Matheus Lourenço**

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-2188-8497>

Universidade Estadual de Campinas, Brasil

E-mail: [matheus.mot12@gmail.com](mailto:matheus.mot12@gmail.com)

### **Maria Teresa Pedrosa Silva Clerici**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8445-336X>

Universidade Estadual de Campinas, Brasil

E-mail: [mclerici@unicamp.br](mailto:mclerici@unicamp.br)

### **Luan Ramos da Silva**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1150-6966>

Universidade Estadual de Campinas, Brasil

E-mail: [luanramosea@gmail.com](mailto:luanramosea@gmail.com)

### **Marcos Vinícius Flores Miranda Nolasco**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8836-1377>

Universidade Estadual de Campinas, Brasil

E-mail: [mnolasco.unicamp@gmail.com](mailto:mnolasco.unicamp@gmail.com)

### **Resumo**

A impressão 3D de alimentos é uma tecnologia inovadora com potencial para transformar a fabricação de alimentos, permitindo a criação de produtos personalizados e sustentáveis. Este trabalho teve por objetivo fazer uma revisão de literatura sobre a aplicação da impressão 3D na produção de alimentos, abordando avanços científicos e tecnológicos. Utilizando técnicas como extrusão, jato de tinta e sinterização seletiva a laser, é possível produzir alimentos a partir de proteínas, carboidratos e lipídios. Esses nutrientes desempenham um papel crucial na formulação dos alimentos impressos, influenciando propriedades como textura, viscosidade e estabilidade, impactando diretamente na qualidade final dos produtos. Embora as diversas vantagens, como a personalização e a redução de desperdícios, ainda há desafios significativos. Entre os principais estão a complexidade técnica, o alto custo dos equipamentos e a limitada aceitação pública, devido ao desconhecimento dos benefícios da impressão 3D. Somado a isso, questões de segurança alimentar, padronização dos processos e escalabilidade precisam ser resolvidas para que a tecnologia seja amplamente adotada. A técnica de extrusão tem sido amplamente utilizada devido à sua flexibilidade no manuseio de formulações viscoelásticas. No entanto, é necessário estudar outras técnicas para a produção de alimentos, como estereolitografia e sinterização seletiva a laser, para ampliar as possibilidades de aplicação, especialmente na criação de alimentos com geometrias complexas ou propriedades nutricionais específicas. Conclui-se que, apesar das limitações atuais, a impressão 3D tem potencial para revolucionar a produção alimentícia, permitindo a criação de produtos que atendam às demandas nutricionais e sensoriais dos consumidores modernos.

**Palavras-chave:** Alimentos impressos; Personalização; Macronutrientes.

### **Abstract**

3D food printing is an innovative technology with the potential to transform food manufacturing, enabling personalization and the creation of sustainable products. This study aims to review the application of 3D printing in food production, addressing scientific and technological advancements. Using techniques such as extrusion, inkjet printing, and selective laser sintering, it is possible to produce foods from proteins, carbohydrates, and lipids. These nutrients play a crucial role in the formulation of printed foods, influencing properties like texture, viscosity, and stability, directly impacting the final quality of the products. Despite numerous advantages, such as customization and waste reduction, significant challenges remain. Among the main obstacles are technical complexity, high equipment costs, and limited public acceptance due to a lack of awareness about the benefits of 3D printing. Additionally, issues related to food safety, process standardization, and scalability must be addressed for the technology to achieve widespread adoption. The extrusion technique has been widely used due to its flexibility in handling viscoelastic formulations. However, further exploration of other techniques for food production, such as stereolithography and

selective laser sintering, is necessary to expand application possibilities, particularly in creating foods with complex geometries or specific nutritional properties. It concludes that, despite current limitations, 3D printing has the potential to revolutionize food production by enabling the creation of products that meet the nutritional and sensory demands of modern consumers.

**Keywords:** Printed foods; Personalization; Macronutrients.

### Resumen

La impresión 3D de alimentos es una tecnología innovadora con el potencial de transformar la fabricación alimentaria, permitiendo la creación de productos personalizados y sostenibles. Este trabajo tuvo como objetivo revisar la literatura sobre su aplicación en la producción de alimentos, destacando avances científicos y tecnológicos. Con técnicas como extrusión, inyección de tinta y sinterización selectiva por láser, es posible fabricar alimentos a partir de proteínas, carbohidratos y lípidos, nutrientes esenciales que influyen en propiedades como textura, viscosidad y estabilidad, impactando directamente en la calidad del producto final. Aunque ofrece ventajas como la personalización y la reducción de desperdicios, aún enfrenta desafíos importantes, como la complejidad técnica, el alto costo de los equipos y la limitada aceptación pública debido al desconocimiento de sus beneficios. Además, cuestiones relacionadas con la seguridad alimentaria, la estandarización de procesos y la escalabilidad deben resolverse para una adopción generalizada. La extrusión es la técnica más utilizada por su flexibilidad con formulaciones viscoelásticas, pero otras tecnologías como la estereolitografía y la sinterización selectiva por láser necesitan ser exploradas para ampliar aplicaciones, especialmente en la creación de alimentos con geometrías complejas o propiedades nutricionales específicas. En conclusión, a pesar de las limitaciones actuales, la impresión 3D tiene el potencial de revolucionar la industria alimentaria, permitiendo productos que satisfagan las demandas nutricionales y sensoriales de los consumidores modernos.

**Palabras clave:** Alimentos impresos; Personalización; Macronutrientes.

## 1. Introdução

A impressão 3D ou manufatura aditiva é uma tecnologia que cria objetos tridimensionais depositando material camada por camada por meio de modelos digitais e pode ser aplicada em diversas áreas (Chua et al., 2014; Jiménez et al., 2019). Embora a impressão 3D seja frequentemente associada a impressoras domésticas de baixo custo, ela abrange uma gama de sistemas mais complexos com diferentes capacidades e adequados para diferentes indústrias (Brischetto et al., 2017; Çalişkan, 2019). Desde a sua invenção na década de 1980, com o desenvolvimento da estereolitografia, foram desenvolvidas diversas técnicas que permitem a fabricação precisa de peças e estruturas (Kumar et al., 2021).

Dentre as técnicas de impressão 3D, destacam-se: a impressão por jato de tinta, que permite alta precisão na manipulação de líquidos de baixa viscosidade (Maniglia et al., 2021; Shirazi et al., 2015). Na área de alimentos, a impressão 3D pode personalizar os alimentos e ajustar sua forma, textura e conteúdo nutricional, com potencial para atender às necessidades específicas de diferentes públicos, como idosos e atletas, pois possibilita a criação de alimentos com perfis nutricionais precisos (Sun et al., 2015; Sun et al., 2018; Chen et al., 2019; Portanguen et al., 2019). A tecnologia ajuda a reduzir desperdícios, tornando-se uma opção mais sustentável e proporcionando novas soluções para a indústria alimentícia, embora ainda permaneçam desafios como padronização e otimização de processos (Malone & Lipson, 2007; Godoi et al., 2016; Long et al., 2017; Bravi & Murmura, 2020).

Porém, a impressão 3D de alimentos ainda não tem sido amplamente utilizada, principalmente devido à complexidade da tecnologia envolvida e ao alto custo das impressoras utilizadas (Liu et al., 2017; Ross et al., 2022). A aceitação pública também é um desafio, pois muitos consumidores ainda desconhecem sobre essa tecnologia, o que exige esforços para conscientizar sobre a segurança e as vantagens desta nova forma de produzir alimentos (Jasanoff, 2015; Brunner et al., 2018).

Apesar dos seus desafios, a impressão 3D tem contribuído para transformar a produção alimentar, particularmente em termos de personalização (Caulier et al., 2020; Nadagouda et al., 2020). Ao combinar de forma eficaz os diferentes macronutrientes, como as proteínas, lipídios e carboidratos, pode se tornar uma importante ferramenta para melhorar a qualidade nutricional dos alimentos (Lupton, 2017; Sun et al., 2015). Para explorar plenamente esses benefícios, é necessário avançar nas pesquisas e desenvolver métodos mais eficientes e acessíveis (Liu et al., 2017; Sun et al., 2018).

Sendo assim, o presente trabalho tem como objetivo revisar a aplicação da impressão 3D na produção de alimentos, destacando os avanços científicos e tecnológicos. Esta revisão busca explorar a história e a evolução da impressão 3D, as principais técnicas de impressão 3D empregadas, as contribuições das macromoléculas na formulação de alimentos impressos, bem como as perspectivas futuras e os desafios enfrentados por esta tecnologia.

## 2. Metodologia

Realizou-se uma pesquisa de natureza qualitativa e do tipo revisão bibliográfica (Pereira et al., 2018) e, o tipo específico foi o de revisão bibliográfica narrativa (Rother, 2007; Mattos, 2015; Casarin et al., 2020) que é uma revisão não sistemática. A busca foi realizada em bases de dados como “Web of Science”, “Scopus”, “ScienceDirect”, “Google Acadêmico” e “SciELO”, utilizando termos como food 3D printing, additive manufacturing, edible inks e food inks. Foram priorizadas fontes mais recentes, mas sem restrição de data de publicação. A revisão abrangeu conteúdos disponíveis nas bases mencionadas, bem como resultados de teses e dissertações, com o objetivo de proporcionar uma análise ampla e atualizada sobre o tema (Silva & Vilela, 2019).

## 3. Resultados e Discussão

### 3.1 Evolução tecnológica da impressão 3D ao longo dos anos

A primeira impressora 3D surgiu na década de 1980, utilizando estereolitografia (tecnologia de impressão 3D que se baseia na fotopolimerização de uma resina por meio de um feixe de laser UV), para solidificar resinas e produzir peças plásticas de forma rápida e controlada (Badotti, 2003). No ano de 1986, Chuck Hull solicitou a patente da impressão por estereolitografia, e por diversos autores, é considerado o criador da impressora 3D (Kessler et al., 2020). Anos depois, Chuck Hull fundou a empresa 3D Systems Corporation, que rapidamente se estabeleceu como uma das líderes da indústria. Essas máquinas se mostraram uma solução eficiente para a construção e modelagem de protótipos que seriam mais difíceis de criar utilizando técnicas tradicionais de fabricação (Jesus & Peres, 2021; Jhang et al., 2021).

Na mesma época em que Chuck Hull patenteou a estereolitografia, Carl Deckard desenvolveu o conceito do processo de sinterização seletiva a laser (SLS) na Universidade do Texas, para sua tese de mestrado. O processo de SLS funciona traçando um padrão de cada seção transversal do design 3D em um leito de pó com um feixe de laser. Esse laser funde as partículas de pó de polímero, construindo a peça camada por camada. Deckard fundou a Desktop Manufacturing Corporation (DTM Corp), que lançou suas primeiras impressoras SLS em 1992. A DTM foi posteriormente adquirida pela 3D Systems (Mazzoli, 2013; Su & Al'Aref, 2018). Em 1993, Deckard estabeleceu a Sinterstation 2000, que consolidou a tecnologia SLS no setor industrial. Enquanto isso, em 1989, S. Scott e Lisa Crump fundaram a Stratasys e patentaram um método de prototipagem rápida conhecido como modelagem por fusão e deposição (FDM) (Su & Al'Aref, 2018; Enyan et al., 2024). Este processo utiliza um cabeçote extrusor para construir objetos através da fusão e deposição de filetes de material, camada por camada (Foggiatto et al., 2004).

A Stratasys se destacou na tecnologia de impressão 3D ao desenvolver sistemas baseados em FDM. Após a expiração da patente em 2005, surgiram dois projetos inovadores: o RepRap, que buscava criar uma impressora 3D de baixo custo capaz de imprimir seus próprios componentes, e o Fab@Home, focado em um design simplificado e acessível (Malone & Lipson, 2007; Kulkarni & Pearce, 2023). A impressão 3D, inicialmente utilizada em setores como indústria e engenharia, expandiu seus horizontes para a produção de alimentos. Essa tecnologia inovadora permite criar estruturas complexas e personalizadas a partir da deposição sucessiva de camadas de materiais comestíveis. Além de possibilitar a criação de alimentos com perfis nutricionais específicos, a impressão 3D abre novas possibilidades para o design de produtos com texturas e formatos

diferenciados, além de simplificar as operações na indústria (Godoi et al., 2016; Padhiary et al., 2024).

A impressão 3D tem sido um catalisador para a otimização dos processos de prototipagem e produção, impactando significativamente setores como aviação, medicina e o setor automotivo. A personalização em massa, a eficiência econômica, a flexibilidade de design e a redução do lead time são alguns dos principais fatores que impulsionam a adoção dessa tecnologia (Neamah & Tandio, 2024; Bisht et al., 2024).

Além de suas aplicações tradicionais, essa tecnologia apoia a manufatura sustentável ao reduzir o desperdício, a demanda de energia e as emissões de carbono (Nadagouda et al., 2020). As inovações nessa área estão beneficiando amplamente as aplicações ambientais pelo fato dessa manufatura colaborar para a redução da geração de resíduos (Bisht et al., 2024).

Consolidada como uma ferramenta versátil, essa técnica tem sido amplamente utilizada na indústria alimentícia. Pesquisadores estão explorando essa tecnologia para atender às necessidades específicas de diferentes grupos populacionais, como idosos, crianças e atletas, desenvolvendo alimentos com texturas e sabores adaptados para cada público. Em pacientes idosos que enfrentam sérios problemas alimentares, como a disfagia ou desnutrição, a impressão 3D torna-se essencial na escolha adequada de alimentos personalizados para garantir o conforto, segurança na deglutição e uma nutrição adequada (Godoi et al., 2016; Chao et al., 2024).

### **3.2 Técnicas de impressão 3D**

Primeiramente, vale ressaltar a impressão 3D consiste na adição de camadas sucessivas de um material, que pode ser líquido, sólido ou pastoso, utilizando bicos injetores controlados automaticamente por um programa de modelagem, criando assim um objeto tridimensional ao mover-se nos eixos X, Y e Z do plano cartesiano, sendo que a impressora possui uma base que se desloca no eixo Z e um cabeçote de impressão que se movimenta nos eixos X e Y para formar a estrutura desejada (Malaghini et al., 2022).

O material é o componente chave na impressão 3D. Suas propriedades intrínsecas, como a viscosidade e a resistência mecânica, irão influenciar diretamente no resultado da impressão. Portanto, a técnica de impressão 3D deverá se adaptar também às características do material que será utilizado em um determinado experimento. Dito isso, este tópico revisará as principais técnicas de impressão 3D, com foco na avaliação da qualidade da impressão e nas características do objeto impresso por ela, proporcionando uma visão mais abrangente de como essas tecnologias podem ser utilizadas na produção alimentícia.

#### **3.2.1 Impressão 3D a jato de tinta**

A impressão 3D a jato de tinta é uma categoria de manufatura aditiva que permite a construção de estruturas tridimensionais por meio da ejeção de gotas minúsculas de tinta, que geralmente possuem cerca de 13 micrômetros de diâmetro, através de canais que podem variar de 20 a 50 micrômetros (Godoi et al., 2016; Holland et al., 2018). A impressão pode ser contínua ou sob demanda, com o fluido sendo forçado através de um orifício e se transformando em uma série de gotas uniformes. Na forma contínua, a tinta é depositada de forma constante, enquanto sob demanda a tinta é depositada por batelada, através de uma válvula que vai regulando e liberando a quantidade que é ejetada, sendo que esta última é mais lenta e precisa, comparado com a primeira forma (Baiano, 2020; Zub et al., 2022).

Essa técnica é ideal para criar padrões usando diferentes tipos de líquidos (materiais), e se destaca também pela rápida velocidade de fabricação (Shirazi et al., 2015; Godoi et al., 2016). Esta técnica é versátil para a manipulação de materiais de baixa viscosidade, como molhos, chocolates, glacês, géis e pastas (Maniglia et al., 2021; Sharma et al., 2024), que permitem a criação de padrões detalhados em algumas superfícies, por meio da deposição precisa de pequenas gotas de tinta (Baiano, 2020).

Embora seja mais comum em aplicações de decoração gráfica, a impressão 3D por jato de tinta pode ser utilizada também para microencapsulação, fabricação de tecidos, e para a construção de estruturas tridimensionais em menor escala (Shirazi et al., 2015; Godoi et al., 2016). Em relação aos parâmetros de processamento, deve-se considerar a temperatura do material, a taxa de impressão, o diâmetro do bico e a distância/altura do bico até o produto que será produzido. Este tipo de técnica de impressão 3D não exige uma etapa pós processamento, como o uso de aditivos ou remoção de material em excesso no produto, sendo assim um ponto positivo (Liu et al., 2017).

### **3.2.2 Impressão 3D por extrusão**

Diferente da impressão 3D a jato de tinta, esta técnica se assemelha ao processo convencional de extrusão, e está sendo amplamente estudada devido ao seu potencial de criar produtos com formas e estruturas personalizadas (Nei & Sasaki, 2023). Para esta técnica, são adequados alimentos que, sob pressão, terão a sua forma e estrutura mantidas, conforme descrito por Godoi et al. (2019). O processo envolve a extrusão de materiais/alimentos em estado pastoso ou semissólido por meio de bicos extrusores que são controlados por um computador, permitindo a criação de designs complexos que previamente são elaborados em um software CAD (3D CAD) (Nei & Sasaki, 2023). Sendo assim, o objetivo final é alcançar os mesmos resultados físicos do processo convencional, mas com a vantagem de um design personalizado nutricionalmente (Sun et al., 2018).

A impressão 3D por extrusão pode ser executada de duas maneiras: utilizando a extrusão a quente, na qual os materiais são aquecidos até derreterem e se solidificarem na superfície de impressão, ou através da extrusão em temperatura ambiente, que dispensa o uso de calor e realiza o processo por meio de ligação e moldagem (Godoi et al., 2019; Zhang et al., 2022). Dentre os materiais que podem ser extrudados a temperatura ambiente, pode-se destacar coberturas para bolos, queijos, chocolates e pasta de amendoim, sendo que estes já se solidificam naturalmente na plataforma, sem a necessidade de aquecê-los. Para iniciar o processo, deve ser escolhida a ponta da seringa mais adequada, e portanto, é necessário testar diferentes seringas. A maneira mais recomendada consiste em preencher/carregar a seringa com o material e aplicar uma força de forma manual, a fim de testar a performance de cada agulha, sendo que pontas mais estreitas fornecem uma maior precisão na criação dos objetos (Periard et al., 2007; Hao et al., 2010).

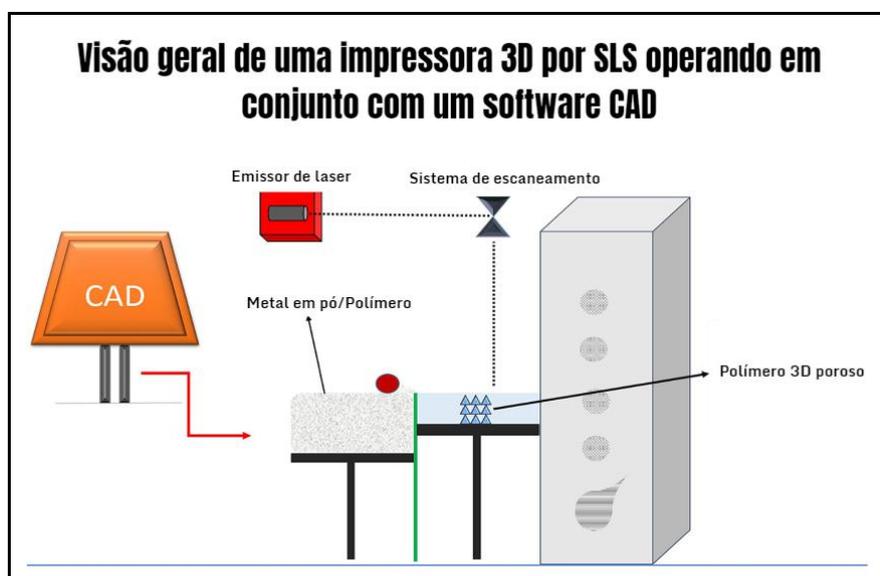
Em algumas técnicas, como a impressão a jato de tinta, não há necessidade de utilizar aditivos (Liu et al., 2017). No entanto, na técnica por extrusão, que depende da deposição contínua de camadas de material e requer tintas coloidais altamente concentradas com teores de sólidos variados (Hao et al., 2010; Godoi et al., 2019), é comum recorrer a aditivos no pós-processamento. Esses aditivos ajudam a manter a forma e a estrutura dos objetos fabricados, além de conferir cor e sabor aos alimentos impressos (Lipton et al., 2010; Liu et al., 2017).

### **3.2.3 Impressão 3D por sinterização seletiva a laser (SLS) e por fusão seletiva a laser (SLM)**

A sinterização seletiva a laser (SLS) é uma técnica de impressão 3D que utiliza um laser para fundir camadas de pó, criando objetos tridimensionais (Godoi et al., 2016). O software CAD desempenha um papel crucial na criação do modelo digital para a impressão 3D, pois esse modelo é enviado ao computador conectado à impressora 3D por SLS, que interpreta as informações e controla o processo de impressão (Song et al., 2024). O laser vai escaneando as seções transversais do pó e funde seletivamente as partículas, formando uma estrutura sólida (Noort et al., 2016; Liu & Zhang, 2019). Após cada camada, o leito de pó é abaixado e uma nova camada é adicionada, repetindo-se o processo até a conclusão do objeto. Muito utilizada na indústria farmacêutica, a SLS envolve processos complexos que dependem do tipo de material e da estrutura desejada do objeto final. Fatores como a porosidade e tratamentos posteriores ao processo de impressão também influenciam o resultado final (Sachlos et al., 2003; Kruth et al., 2007).

Msallem et al. (2020) destacam as vantagens da SLS, como a criação de formas complexas sem a necessidade de estruturas de suporte e a ampla variedade de materiais disponíveis para a produção dos objetos tridimensionais. No entanto, o alto custo e o acabamento superficial relativamente áspero são apontados como desvantagens. Beecroft (2019) e Valino et al. (2019) corroboram com essas informações, enfatizando a capacidade da SLS de produzir peças com geometrias complexas e a ausência de necessidade de estruturas de suporte, assim como Morandini & Del Vecchio (2020) complementam a discussão ao destacar o alto nível de detalhamento e precisão da SLS, embora apontem o tempo de impressão e o custo dos materiais como limitações. A técnica de SLS quando aplicada à indústria alimentícia, é limitada a materiais em pó (Liu & Zhang, 2019), e portanto, futuros estudos com diferentes materiais que não sejam em pó podem ser realizados a fim de expandir os horizontes da engenharia de alimentos. Pode-se observar através da Figura 1 a visão geral de uma impressora 3D operando por SLS operando em conjunto com um software CAD.

**Figura 1** - Ilustração geral de uma impressora 3D operando por fusão seletiva a laser (SLM).

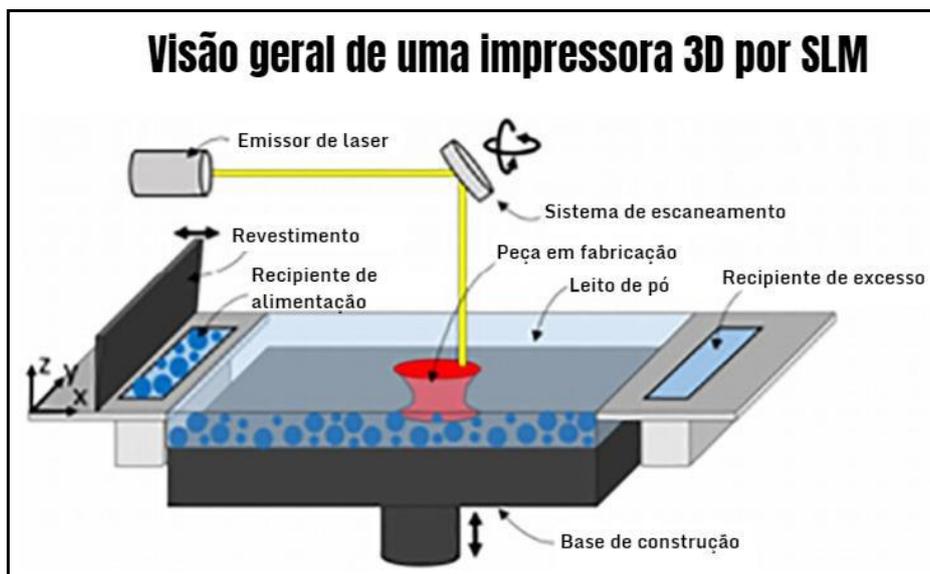


Fonte: Adaptado de Song et al. (2024).

Além do processo de SLS, existe também o processo de fusão seletiva a laser (SLM), que também usa laser para construir objetos tridimensionais a partir de camadas de pó, assim como a técnica de SLS. Conforme destacado por Abdulhameed et al. (2019), a principal diferença entre esses processos reside no grau de fusão do material: o SLS envolve uma fusão parcial, enquanto o SLM realiza uma fusão completa. Essa distinção, no entanto, como apontado por Kruth et al. (2007), é complexa e nem sempre muito clara, pois a gama de materiais e processos utilizados é bem vasta.

A escolha entre a técnica de SLS e SLM depende dos materiais e das propriedades desejadas para o objeto final. Como mencionado por Huang et al. (2020), a SLS e a SLM podem utilizar uma variedade de materiais, desde polímeros e metais até cerâmicas. A SLS, por sua vez, é mais adequada para a produção de protótipos e pré-formas, enquanto o SLM se destaca na fabricação de peças metálicas com alta densidade, como demonstrado por Liu et al. (2022). Na figura 2, pode-se observar uma visão geral esquemática de uma impressora 3D por SLM.

**Figura 2** - Ilustração esquemática de uma impressora 3D por fusão seletiva a laser (SLM).



Fonte: Adaptado de Abdulhameed et al. (2019).

### 3.2.4 Impressão 3D por estereolitografia (SLA)

A estereolitografia (SLA), pioneira na impressão 3D, solidifica resinas líquidas com laser UV, oferecendo alta precisão e detalhes nas peças produzidas. Diferentemente da SLS, a SLA gera peças com superfícies mais lisas e requer menos acabamento, tornando-a uma opção mais econômica e eficiente (Duarte et al., 2024; Er et al., 2024).

Nesta técnica, haverá um tanque de resina líquida que será exposto a um feixe de laser que, ao incidir sobre a superfície, solidifica a resina de forma precisa, seguindo o desenho digital. Essa solidificação ocorre devido à fotopolimerização, um processo químico no qual moléculas se ligam entre si sob a ação da luz UV, transformando a resina líquida em um sólido. A SLA oferece alta precisão e resolução, permitindo a criação de peças com detalhes finos, mas enfrenta desafios relacionados à gama de materiais e resistência mecânica. No entanto, a tecnologia tem demonstrado grande potencial em diversas áreas, como a indústria automotiva e médica (Yun et al., 2016; Wawryniuk et al., 2024; Zhu et al., 2022).

Os sistemas de estereolitografia (SLA) são compostos por uma plataforma perfurada posicionada em um recipiente de resina líquida fotossensível. O feixe de laser ultravioleta é dirigido para um ponto em uma resina fotopolimerizável, controlado por um sistema de espelhos de alta precisão, que irá solidificar a resina camada por camada. A velocidade de construção depende da viscosidade da resina e da área a ser solidificada, sendo a deposição da nova camada o passo mais demorado do processo. Apesar da alta resolução, a viscosidade da resina pode limitar a velocidade de produção e exigir a adição de solventes para facilitar o fluxo do material (Duarte et al., 2024; Ligon et al., 2017; Han & Lee, 2020).

### 3.3 Aplicações da impressão 3D na alimentação: Dos primeiros experimentos às inovações recentes

A impressão 3D de alimentos surgiu na primeira década do século XXI com o desenvolvimento de impressoras equipadas com extrusoras de injeção para depositar pastas alimentícias na forma de camadas. Esse avanço permite pela primeira vez testar produtos alimentícios como o chocolate, cuja impressão exige controle preciso de temperatura e vazão para garantir a qualidade do produto final (Cohen et al., 2009; Mantihal et al., 2017; Periard et al., 2007; You et al., 2023). Desde então, a tecnologia tem sido continuamente aprimorada para otimizar as propriedades térmicas e estruturais dos alimentos impressos, visando criar produtos estáveis e com boas propriedades organolépticas. Além de produtos tradicionais como o chocolate, a impressão 3D também está sendo utilizada para desenvolver análogos de carne de origem vegetal (Godoi et al.,

2016; Singh et al., 2021; Smetana et al., 2018; Wen et al., 2023), com o objetivo de oferecer alternativas aos consumidores que buscam reduzir o consumo de carne animal. Embora as limitações técnicas ainda precisem ser superadas (Tang et al., 2024), a tecnologia pode criar microfibras e estruturas que imitam o tecido muscular. Estudos como o de Smetana et al. (2018), demonstraram o potencial da impressão 3D para criar análogos de carne de insetos através de extrusão em alta umidade, aproximando suas propriedades das da carne convencional. A tecnologia também tem aplicações práticas em ambientes hospitalares (Ross et al., 2021), facilitando a alimentação de pacientes com necessidades específicas, e em ambientes educacionais, tornando a alimentação mais divertida para as crianças (Soares et al., 2016; Sun et al., 2015, 2018). Pode-se observar por meio da Figura 3 a seguir, uma adaptação da figura feita por Sun et al. (2015), que ilustra a ideia da fabricação de um cookie, que é um dos alimentos mais consumidos pelas crianças nos dias de hoje (Soares et al., 2016).

**Figura 3** - Ilustração de um processo de fabricação de um cookie 3D para crianças.



Fonte: Adaptado de Sun et al. (2015).

A impressão 3D de alimentos é afetada pelas macromoléculas, como proteínas, carboidratos e lipídios, para criar estruturas alimentares com diferentes texturas, sabores e valores nutricionais. A seguir, serão discutidos aspectos específicos de proteínas, carboidratos e lipídios na impressão 3D de alimentos, explorando suas propriedades, técnicas aplicadas e resultados obtidos em diferentes estudos literários

### 3.3.1 Macromoléculas na impressão 3D

#### 3.3.1.1 Proteínas

As proteínas são compostos orgânicos complexos formados por longas cadeias de aminoácidos unidos por ligações peptídicas, sendo responsáveis por acelerar reações químicas, fundamentais para o metabolismo celular, além de contribuírem para a formação de estruturas celulares, como membranas e citoesqueleto, dentre outros processos bioquímicos (Almeida et al., 2013; Moreira et al., 2022). Sua variedade estrutural e funcional é bastante ampla, incluindo desde enzimas, que aceleram reações químicas, até hormônios, que funcionam como mensageiros químicos. As proteínas podem ser categorizadas segundo diferentes critérios, como sua composição, podendo ser simples ou conjugadas; sua função, que pode ser enzimática, estrutural, de transporte, entre outras; e sua origem, que pode ser de fontes animais ou vegetais (Chen et al., 2023; Moreira et al., 2022; Tintor et al., 2024).

A caseína do leite e a albumina do ovo são exemplos de proteínas de origem animal, ricas em aminoácidos essenciais, ou seja, aqueles que o organismo humano não consegue sintetizar e, portanto, devem ser adquiridos por meio da dieta. A caseína, por exemplo, possui 8 tipos de aminoácidos essenciais, e é considerada como uma fonte de antioxidantes, assim como outras proteínas derivadas do leite e da carne (Casanova et al., 2021; Corrochano et al., 2019). Por outro lado, algumas proteínas vegetais, como a zeína do milho, apresentam uma quantidade relativamente baixa de aminoácidos essenciais quando comparado com as proteínas do leite e da carne. Compreender a estrutura e a função das proteínas é fundamental para desenvolver novas tecnologias e produtos em diversos setores, como o alimentício, farmacêutico e biotecnológico (Alasubramaniam et al., 2024; Wu et al., 2024). Para entender melhor as aplicações das proteínas na impressão 3D de alimentos, pode-se observar por meio da Tabela 1 que sintetiza diferentes estudos, incluindo a proteína usada, a técnica de impressão 3D aplicada, o objetivo do estudo e os principais resultados obtidos.

Pode-se observar através da Tabela 1, que existem diferentes tipos de proteínas e combinações com outros ingredientes que impactam diretamente nas propriedades dos alimentos impressos pela impressão 3D. Em comum, a técnica de extrusão é amplamente utilizada pela sua versatilidade de manipular formulações com diversas características viscoelásticas, e também outro ponto recorrente é o uso recorrente de proteínas como o caseinato de cálcio e a albumina, que conferem uma maior consistência aos produtos impressos, conforme observados pelos artigos trazidos. Somado a isso, a combinação de emulsificantes com as proteínas tem se mostrado eficaz para melhorar a retenção da forma dos alimentos impressos, ressaltando a importância da interação das proteínas com os outros componentes da formulação para ter sucesso na impressão 3D de um alimento.

**Tabela 1** - Diferentes estudos sobre as aplicações de proteínas na impressão 3D de alimentos: técnicas, objetivos e resultados.

Produto	Técnica de impressão 3D	Formulação	Resultado	Fonte
Surimi de peixe	Sinterização Seletiva a Laser	Cubos frescos cortados de carpa prateada, cloreto de sódio, água	A gelificação térmica da proteína com sinterização seletiva a laser aprimora a resistência e precisão estrutural do surimi impresso	Tong et al. (2024)
Snacks ricos em proteína	Jato de tinta (aglutinante)	Caseinato de cálcio, amido de trigo, triglicerídeos de cadeia média, emulsificante éster de sorbitol de polioxietileno	As proteínas impactaram na elasticidade do alimento impresso, permitindo a criação de diferentes texturas (de desintegrável a elástica), ao ajustar a quantidade de caseinato de cálcio e emulsificante	Zhu et al. (2022)
Géis de concentrado de caseína micelar impressos em 3D	Extrusão	Concentrado de caseína micelar (88% proteína), cloreto de cálcio, citrato trissódico, albumina	As propriedades funcionais do concentrado de caseína micelar influência na consistência da suspensão, capacidade de formar camadas autoportantes e nas características da textura	Ross et al. (2022)
Carne cultivada	Extrusão	Colágeno hidrolisado, lecitina de soja, óleo de canola, água destilada	O colágeno mostrou melhor estabilidade para a impressão das estruturas, em comparação com o óleo de canola utilizado neste estudo	Koranne et al. (2022)
Carne cultivada	Extrusão	Albumina de ovo, proteína de ervilha, estabilizante goma gelana	A albumina de ovo combinada com a proteína de ervilha ajustou a textura e a firmeza do alimento impresso, permitindo uma maior consistência para a impressão 3D	Tsai e Lin (2022)
Géis à base de gelatina modificada com transglutaminase	Extrusão	Gelatina, óleo de soja, transglutaminase, água destilada, resveratrol	O aumento de gelatina favoreceu a produção de géis de emulsões semissólidas com melhor retenção de forma, resistência térmica e mecânica	Zheng et al. (2024)
Purê de batata	Extrusão	Purê de batata em pó, leite integral, água, lecitina de soja, glicerol, ágar-ágar	A lecitina reduziu a viscosidade do purê de batata em ambas as concentrações (0,5% e 1%), facilitando a extrusão	Dankar et al. (2018)

Análogo de Queijo	Extrusão	Caseinato de sódio, celulose microcristalina acetilada, óleo de canola, azeite de oliva, cloreto de cálcio, agentes saborizantes, emulsificantes	A presença do emulsificante juntamente com a cafeína resultou em uma melhor precisão, estabilidade estrutural e aparência do análogo de queijo 3D	Shahbazi et al. (2021)
Barra de proteína com recheio de chocolate	Extrusão	Caseinato de cálcio, concentrado protéico de soro de leite, xarope de milho, triglicerídeos de cadeia média, glicerol, chocolate	A presença de proteínas alterou a textura das barras, elevando a dureza e a coesão, especialmente em padrões concêntricos, pela interação entre a pasta de proteína e o chocolate	Zhu et al. (2021)
Tinta alimentícia à base de proteína de ervilha	Extrusão	Isolado proteico de ervilha, hidrolisado proteico de ervilha, água destilada	A adição de hidrolisado proteico de ervilha reduziu a interação proteica no isolado proteico de ervilha, suavizando a textura e melhorando a precisão da impressão	Lim et al. (2023)

Fonte: Elaborado pelos autores.

### 3.3.1.2 Carboidratos

Os carboidratos, são biomoléculas orgânicas compostas principalmente de carbono, hidrogênio e oxigênio e estão entre as macromoléculas mais abundantes na natureza. Também conhecidas como açúcares ou hidratos de carbono, estas moléculas têm a fórmula empírica  $C_n(H_2O)_n$  e são importantes para uma variedade de processos biológicos (Santos et al., 2014).

A estrutura dos carboidratos pode variar entre as formas cíclicas e acíclicas, e sua classificação inclui três grupos principais: monossacarídeos, que são unidades simples como a glicose e a frutose, que são formados a partir de cadeias curtas de açúcares simples; dissacarídeos, que são formados a partir de dois monossacarídeos unidos, como a maltose, sacarose (essencial fonte de açúcar na dieta), e a lactose; oligossacarídeos, que são formados por 3 a 10 unidades de monossacarídeos, como a rafinose (galactose-glicose-frutose), e os polissacarídeos que são compostos por longas cadeias, como o amido (que é um carboidrato digerível) e a pectina (tipo de fibra) (Haghighatjoo et al., 2024; Li et al., 2024; Nelson & Cox, 2022).

Esses compostos atuam no armazenamento e fornecimento de energia aos seres vivos, assim como o amido nas plantas e o glicogênio nos animais. No corpo humano e em animais, eles são decompostos para liberar glicose, que é usada em reações metabólicas e serve como principal fonte de energia para a prática de exercícios físicos. Porém, a função dos carboidratos vai além de fornecer energia, já que eles são importantes para a estrutura e sinalização celular. Variações em sua estrutura, como a presença de cadeias ramificadas e diferentes ligações glicosídicas, conferem a cada tipo de carboidrato propriedades físico-químicas específicas, podendo afetar a doçura e principalmente a textura, ou seja, essa macromolécula irá impactar diretamente no produto final produzido pela impressora 3D (Molina et al., 2024; Nelson & Cox, 2022; Ulloa et al., 2021). Pode-se observar por meio da Tabela 2 diferentes estudos, inclusive o carboidrato utilizado, a técnica de impressão 3D aplicada, o objetivo do estudo e os principais resultados obtidos.

A partir da Tabela 2, nota-se que diferentes tipos de carboidratos e suas combinações com outros ingredientes também influenciam de maneira significativa as propriedades dos alimentos impressos em 3D. Majoritariamente, a técnica de extrusão foi utilizada para realizar a impressão de formulações contendo carboidratos, e entre esses, o amido e suas variações foram os mais utilizados, oferecendo uma maior estabilidade e precisão na impressão, enquanto outros ingredientes como fibras e gomas auxiliaram na manutenção da forma e ajuste da textura do alimento impresso, que se combinadas, o resultado poderia ter sido mais promissor. Além disso, apenas um dos artigos analisados utilizou a técnica de impressão 3D por sinterização seletiva a laser, o que indica a necessidade de mais estudos que investiguem a adaptação da SLS na impressão de alimentos que possuem carboidratos nas formulações. Isso também vale para outros métodos de manufatura aditiva, como a impressão 3D a jato de tinta, a fusão seletiva a laser e a estereolitografia.

**Tabela 2** - Diferentes estudos sobre as aplicações de carboidratos na impressão 3D de alimentos: técnicas, objetivos e resultados.

Produto	Técnica de impressão 3D	Formulação	Resultado	Fonte
Alimentos à base de amido	Sinterização Seletiva a Laser	Amido de trigo, maltodextrina, óleo de palma	As propriedades do amido de trigo permitiram maior rigidez e controle da textura, tornando o alimento mais denso e menos dúctil	Jonkers et al. (2022)
Cookie	Extrusão	Farinha de aveia, farinha de centeio, farinha de arroz, farinha de alfarroba, gordura (azeite de oliva e manteiga, mel)	As farinhas com maior teor de fibras (centeio e alfarroba) aumentaram a consistência da massa, permitindo uma impressão mais precisa e um formato 3D mais estável	Vukušić Pavičić et al. (2021)
Carne de origem vegetal	Extrusão	Goma xantana, pó de spirulina, proteína de spirulina, cera de girassol, amido de batata, maltodextrina, óleo de coco, inulina, óleo de palma, óleo de soja	A goma xantana estabilizou a estrutura do gel, tornando o alimento impresso mais macio e suculento, com menor perda de umidade e encolhimento durante o cozimento.	Guo et al. (2024)
Alimentos semissólidos à base de amido	Extrusão	Amido de milho parcialmente pré-gelatinizado com 73% de amilopectina e 27% de amilose, água deionizada	O amido afetou a extrudabilidade e a estabilidade, proporcionando boa moldagem, e afetou a fragilidade das estruturas impressas após a hidratação	Bugarin-Castillo et al. (2023)
Bolo Chinês (Mooncake)	Extrusão	Goma arábica, farinha de trigo, pasta de feijão vermelho, óleo de soja	A adição da goma arábica juntamente com o óleo de soja reduziu a dureza do produto impresso, resultando em um bolo de fácil deglutição	Wang et al. (2023)
Sorvete	Extrusão	Amidos de mandioca modificados (13 tipos diferentes), açúcar, leite em pó, óleo de palma, água destilada	O amido modificado do tipo fosfato de hidroxipropil diamido (E1442) melhorou a precisão da impressão do sorvete e apresentou maior retenção de água, comparado com os outros tipos de amidos de mandioca modificados	Xu et al. (2024)
Hidrogéis com pectina	Extrusão	Pectina, nanocristais de celulose, dextrose e cálcio	Tintas alimentares formuladas com pectina de baixo grau de metoxilação (LMP) apresentaram comportamento reológico pseudoplástico, indicando propriedades de cisalhamento e viscoelasticidade adequadas para impressão 3D	Lu et al. (2023)
Tinta alimentícia à base de ervilha	Extrusão	Amido de ervilha, fibra insolúvel de ervilha, proteína de ervilha, água	O amido de ervilha não influenciou significativamente a extrudabilidade e a construtibilidade das tintas alimentares, que foram mais afetadas pela proporção de proteínas e fibras	Venkatachalam et al. (2023)
Gel de emulsão Pickering	Extrusão	Goma xantana, chá verde, óleo de oliva, probiótico	À medida que a concentração de goma xantana aumentou, houve um aumento na resistência do gel, estabilidade, no módulo de armazenamento e no módulo de perda	Xu et al. (2023)
Hidrogéis	Extrusão	Amido de semente de manga, amido-arabinosilano (polissacarídeo), água	Alto teor de amido melhora a impressão 3D, conferindo comportamento sólido e alta tixotropia, favorecendo a integridade estrutural da formulação	Montoya et al. (2021)

Fonte: Elaborado pelos autores.

### 3.3.1.3 Lipídios

Os lipídios são macromoléculas solúveis em solventes orgânicos, e também são definidos como um grupo de compostos não solúveis em água, que podem ser divididos em diferentes categorias com base em sua estrutura e composição. Eles podem ser classificados em lipídios simples, como álcoois e ésteres de ácidos graxos, e lipídios complexos, como fosfolipídios e outros lipídios contendo grupos adicionais, como o ácido fosfórico. Outra forma de distinção considera a polaridade: lipídios apolares (como triacilgliceróis e colesterol) e lipídios polares (como fosfolipídios) possuem propriedades e funções de solubilidade diferentes. Além disso, as cadeias de ácidos graxos que compõem os lipídios podem ser classificadas

de acordo com seu comprimento (curto, médio ou longo) e seu grau de saturação: saturadas (sem ligações duplas) ou insaturadas (apresentam ligações duplas) (Asokapandian et al., 2021; Domínguez et al., 2022; Pateiro et al., 2019).

As propriedades técnicas dos lipídios afetam aspectos como textura, sabor e estabilidade do produto. A viscosidade do óleo, a plasticidade da gordura, a exsudação do óleo, e a estabilidade física em relação a formação/sedimentação de cristais são propriedades essenciais que podem afetar no resultado do alimento que será impresso pela impressora 3D, sendo que materiais mais viscosos podem exigir ajustes de temperatura e pressão para garantir uma impressão mais adequada (Chaves et al., 2018; Zhong et al., 2024). Pode-se observar através da Tabela 3 algumas aplicações e estudos que envolvem lipídios na impressão 3D de alimentos, bem como seus objetivos, resultados e as técnicas de impressão utilizadas.

A análise dos estudos apresentados pela Tabela 3 revela a importância dos lipídios na otimização das propriedades das formulações utilizadas na impressão 3D de alimentos. De modo geral, a adição de lipídios, seja na forma de manteigas, oleogéis, ou óleos vegetais, mostrou-se essencial para influenciar as características de viscosidade e estabilidade, impactando de forma direta na qualidade da impressão. Por exemplo, a presença de óleos vegetais, como o de canola e oliva, ajudaram a melhorar a fluidez e a estabilidade das pastas e tintas alimentícias, garantindo impressões mais precisas.

Outro ponto crucial entre os estudos é a utilização da técnica de extrusão, como a mais aplicada para formulações que contêm lipídios. Essa preferência pode ser explicada pela necessidade de controlar com mais precisão a viscosidade e a consistência dos compostos durante a impressão 3D. Destacam-se também que os lipídios não só facilitam a impressão dos alimentos 3D, como também favorecem as propriedades funcionais e sensoriais dos alimentos, como sabor, textura, absorção de gordura e retenção de umidade, contribuindo para produtos mais saborosos, atrativos e comparáveis com os métodos de fabricação tradicionais.

**Tabela 3** - Diferentes estudos sobre as aplicações de lipídios na impressão 3D de alimentos: técnicas, objetivos e resultados.

Produto	Técnica de impressão 3D	Formulação	Resultado	Fonte
Chocolate	Extrusão	Cacau, manteiga de cacau, gordura de leite, lecitina de soja, estearato de magnésio	A gordura e a manteiga de cacau ajudaram a manter a fluidez e a rigidez do chocolate, garantindo uma impressão uniforme e evitando o colapso das estruturas	Lanaro et al. (2017)
Chocolate	Extrusão	Cobertura de chocolate amargo sem açúcar (55,3% de gordura), extrato de alfarroba, lecitina de girassol	A substituição de 30% de extrato de alfarroba manteve uma textura e estabilidade mais ideal, com melhor umidade e viscosidade. A impressão foi precisa e com boa aceitação sensorial	Erunsal et al. (2023)
Pastas à base de amido de milho e óleo de canola	Extrusão	Óleo de canola, amido de milho, água, isolado protéico de soro de leite	A pasta com 37% de óleo de canola apresentou uma boa imprimibilidade após 24 horas de armazenamento a 4 °C, com a viscosidade e o valor do módulo de armazenamento (G') aumentados, o que melhorou a estabilidade na impressão	Liu & Ciftci (2021)
Food inks à base de farinha de batata e cogumelo	Extrusão	Azeite de oliva extravirgem, batatas ( <i>Solanum tuberosum</i> ), cogumelos brancos ( <i>Agaricus bisporus</i> ), água	A adição de azeite aumentou a viscosidade, melhorou o fluxo através do bico durante a impressão, melhorou a impressão e reduziu a aderência das formulações	Reche et al. (2024)
Bigels à base de óleo de girassol e gelatina de peixe	Extrusão	Gelatina de peixe, óleo de girassol com alto teor de ácido oleico, cera de candelila, emulsificantes (monoglicerídeo de estearato, éster de poliglicerol de ácido ricinoléico interesterificado e lecitina)	O óleo de girassol presente no gel formulado proporcionou uma estrutura de gel homogênea e estável quando combinado com monoglicerídeos ou lecitina	Xie et al. (2023)

Oleogel à base de triglicerídeos de cadeia média	Extrusão	Óleo de coco, gelatina, trans-resveratrol, curcumina, água destilada	O oleogel com TCMs melhorou a absorção da curcumina e do resveratrol, garantindo proteção durante a digestão e liberação específica no intestino	Kavimu ghil et al. (2022)
Purê de batata	Extrusão	Purê de batata, proteína em pó de ervilha, proteína em pó de grilo, manteiga em pó, água	A adição de manteiga em pó reduziu a firmeza dos purês de batatas impressos	Scheele et al. (2023)
Cookie	Extrusão	Farinha de aveia, farinha de centeio, farinha de arroz, farinha de alfarroba, gordura (azeite de oliva e manteiga), mel	A massa com azeite teve maior viscosidade e menor uma perda de cozimento que a com manteiga, proporcionando biscoitos impressos com mais precisão e consistência.	Vukušić Pavičić et al. (2021)
Análogo de carne	Extrusão	Óleo de canola, glúten de trigo, isolado protéico de soja, hidrocolóides (goma xantana, pectina, goma guar, goma de alfarroba e hidroxipropilmetilcelulose)	Óleo de canola na formulação favoreceu a retenção de umidade e melhorou a absorção de gordura durante a fritura, contribuindo para uma textura mais próxima da carne tradicional. Além de influenciar na cor, tornando-os mais atraentes.	Bhuiyan et al. (2025)
Manteiga de macadâmia integral ultrafina	Extrusão	Manteiga de macadâmia integral, gelificantes (cera de abelha, monoglicerídeos estearato, cera de farelo de arroz, gamma-oryzanol e beta-sitosterol)	Os gelificantes reduziram a taxa de separação de óleo, otimizando o desempenho da impressão 3D de alimentos que possuem lipídios na formulação	Shuai et al. (2024)

Fonte: Elaborado pelos autores.

#### 4. Perspectivas Futuras e Desafios

Embora a impressão 3D ofereça vantagens como personalização e inovação, ainda não é amplamente convencional devido à sua complexidade técnica, custos elevados e desafios relacionados à segurança e padronização (Portanguen et al., 2019). Esses fatores, aliados à necessidade de mais estudos sobre as diferentes tintas alimentícias e técnicas de impressão 3D, tornam a tecnologia promissora, mas ainda distante de uma produção em massa (Lupton, 2017). Os principais desafios se destacam por:

- Técnicas de impressão 3D: Embora a técnica de extrusão seja amplamente utilizada na impressão 3D de alimentos devido à sua flexibilidade no manuseio de formulações viscoelásticas, ainda faltam pesquisas explorando ingredientes e outros métodos de impressão (Zheng et al., 2021). Técnicas como SLS, impressão a jato de tinta e estereolitografia têm potencial para criar produtos com maior complexidade estrutural e funcional (Valino et al., 2019), no entanto, essas abordagens ainda estão em estágios iniciais de pesquisa, demandando estudos para sua adaptação ao setor alimentício e exploração de novas possibilidades comerciais.
- Produtos comercializados feitos por impressão 3D: Produtos alimentícios impressos em 3D ainda enfrentam desafios significativos para alcançar o mercado em escala comercial. Aspectos como o tempo necessário para impressão, estabilidade do produto final, rotulagem adequada e o impacto de aditivos nas formulações das tintas alimentícias precisam ser mais bem explorados para garantir sua viabilidade (Voon et al., 2019; Gholamipour-Shirazi et al., 2019). Além disso, a aceitação do consumidor é outro ponto crítico, pois muitos ainda priorizam confiabilidade e segurança alimentar em vez de atributos sensoriais, como sabor, ao avaliar alimentos produzidos por impressão 3D (Shigi & Seo, 2024). Para superar essas barreiras, é essencial adotar estratégias de comunicação eficazes que disseminem informações claras e motivem os consumidores a aceitar esses produtos como opções viáveis e inovadoras (Martini et al., 2019).
- Segurança alimentar e pós-processamento: Outro desafio crítico está relacionado à segurança alimentar e ao pós-processamento de alimentos impressos (Lupton, 2017). Muitos métodos atuais podem comprometer o valor

nutricional e a qualidade sensorial dos produtos (Shen et al., 2023). Além disso, a falta de diretrizes para limpeza de equipamentos e armazenamento de alimentos impressos cria barreiras significativas para sua comercialização, sendo assim necessário desenvolver processos que garantam a segurança e a sustentabilidade dos produtos, como técnicas de esterilização que preservem propriedades sensoriais, atendendo às exigências do mercado e do consumidor (Guo et al., 2024).

## 5. Conclusão

A impressão 3D de alimentos é uma tecnologia promissora que pode transformar a indústria alimentícia. Ao permitir a criação de produtos personalizados com propriedades nutricionais e sensoriais controladas, a tecnologia abre novas possibilidades para atender às necessidades de consumidores cada vez mais exigentes.

As macromoléculas desempenham um papel fundamental na determinação das propriedades dos alimentos impressos. Proteínas, carboidratos e lipídios afetam a viscosidade, textura e estabilidade da formulação, afetando diretamente a qualidade do produto final. A combinação adequada destas macromoléculas e a otimização dos parâmetros de impressão são cruciais para a obtenção de produtos alimentares com as propriedades desejadas, e, portanto, são necessárias mais pesquisas para compreender melhor essas combinações, a fim de otimizar as propriedades dos alimentos e ampliar as possibilidades de aplicação.

Em relação às técnicas de impressão 3D, embora a técnica de extrusão seja a mais usada, explorar outras técnicas é importante para ampliar as possibilidades de aplicação. A escalabilidade do processo e a segurança dos alimentos impressos são alguns dos obstáculos que precisam ser mais estudados. À medida que a investigação avança e novas tecnologias são desenvolvidas, esta tecnologia tem o potencial de transformar a forma como produzimos e consumimos alimentos, fornecendo produtos personalizados, nutritivos e compatíveis com o mercado atual de alimentos.

## Financiamento

Esta pesquisa foi financiada pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES — código 001) (88887.829982/2023-00) e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq: 141413/2019-0; 312660/2023-5)

## Referências

- Abdulhameed, O., Al-Ahmari, A., Ameen, W., & Mian, S. H. (2019). Additive manufacturing: Challenges, trends, and applications. *Advances in Mechanical Engineering*, 11(2), 168781401882288. <https://doi.org/10.1177/1687814018822880>
- Almeida, V. V., Canesin, E. A., Suzuki, R. M., & Palioto, G. F. (2013). Análise qualitativa de proteínas em alimentos por meio de reação de complexação do íon cúprico. *Química Nova na Escola*, 35(1), 34-40.
- Asokapandian, S., Sreelakshmi, S., & Rajamanickam, G. (2021). *Lipids and Oils: An Overview*. In: Gani, A., Ashwar, B.A. (eds) Food biopolymers: Structural, functional and nutraceutical properties. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-27061-2\\_16](https://doi.org/10.1007/978-3-030-27061-2_16)
- Badotti, A. V. B. (2003). *Avaliação do processo de metalização superficial aplicado a peças obtidas por estereolitografia*. Dissertação de mestrado (Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Santa Catarina. 149 p.
- Baiano, A. (2020). 3D Printed Foods: A Comprehensive Review on Technologies, Nutritional Value, Safety, Consumer Attitude, Regulatory Framework, and Economic and Sustainability Issues. *Food Reviews International*, 38(5), 1–31. <https://doi.org/10.1080/87559129.2020.1762091>
- Balasubramaniam, S. P. L., Tajvidi, M., & Skonberg, D. (2024). Hydrophobic corn zein-modified cellulose nanofibril (CNF) films with antioxidant properties. *Food Chemistry*, 458, 140220. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.140220>
- Bhuiyan, Md. H. R., Yeasmen, N., & Ngadi, M. (2024). Effect of food hydrocolloids on 3D meat-analog printing and deep-fat-frying. *Food Hydrocolloids*, 159, 110716. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2024.110716>

- Bisht, B., Begum, J.P.S., Dmitriev, A. A., Kurbatova, A., Singh, N., Katsuyoshi Nishinari, Nanda, M., Kumar, S., Vlaskin, M. S., & Kumar, V. (2024). Unlocking the potential of future version 3D food products with next generation microalgae blue protein integration: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 147, 104471–104471. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2024.104471>
- Alencastro, R. B., & Bracht, F. (2011). Sobre a Nomenclatura de Carboidratos. *Revista Virtual de Química*, 3(4). <https://doi.org/10.5935/1984-6835.20110039>
- Bravi, L., & Murmura, F. (2021). Additive Manufacturing in the Food Sector: A Literature Review. *Macromolecular Symposia*, 395(1), 2000199. <https://doi.org/10.1002/masy.202000199>
- Brischetto, S., Maggiore, P., & Ferro, C. (2017). Special Issue on “Additive Manufacturing Technologies and Applications.” *Technologies*, 5(3), 58. <https://doi.org/10.3390/technologies5030058>
- Brunner, T. A., Delley, M., & Denkel, C. (2018). Consumers’ attitudes and change of attitude toward 3D-printed food. *Food Quality and Preference*, 68, 389–396. <https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2017.12.010>
- Bugarin-Castillo, Y., Rando, P., Clabaux, M., Moulin, G., & Ramaioli, M. (2023). 3D printing to modulate the texture of starch-based food. *Journal of Food Engineering*, 350, 111499. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2023.111499>
- Casanova, F., Lima, G., Naaman F.N. Silva, Fernandes, A., & Frédéric Gaucheron. (2021). Interactions between caseins and food-derived bioactive molecules: A review. *Food Chemistry*, 359, 129820–129820. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129820>
- Casarin, S. T., Porto, A. R., Gabatz, R. I. B., Bonow, C. A., Ribeiro, J. P., & Mota, M. S. (2020). Tipos de revisão de literatura: considerações das editoras do *Journal of Nursing and Health*. *Journal of Nursing and Health*, 10(n. esp.), e20104031. <https://doi.org/10.1080/1364557032000119616>
- Caulier, S., Doets, E., & Noort, M. (2020). An exploratory consumer study of 3D printed food perception in a real-life military setting. *Food Quality and Preference*, 86, 104001. <https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2020.104001>
- Chao, C., Hyong Kyong Nam, Hyun Jin Park, & Hyun Woo Kim. (2024). Potentials of 3D printing in nutritional and textural customization of personalized food for elderly with dysphagia. *Applied Biological Chemistry*, 67(1). <https://doi.org/10.1186/s13765-023-00854-7>
- Chaves, K. F., Barrera-Arellano, D., & Ribeiro, A. P. B. (2018). Potential application of lipid organogels for food industry. *Food Research International*, 105, 863–872. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.12.020>
- Chen, H., Xie, F., Chen, L., & Zheng, B. (2019). Effect of rheological properties of potato, rice and corn starches on their hot-extrusion 3D printing behaviors. *Journal of Food Engineering*, 244, 150–158. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.09.011>
- Chen, J., Gao, Q., Zhang, X., Basse, A. P., Zeng, X., Zhou, G., & Xu, X. (2022). A structural explanation for protein digestibility changes in different food matrices. *Food Hydrocolloids*, 136, 108281–108281. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2022.108281>
- Chua, C. K., Leong, K. F., & An, J. (2014). *Introduction to rapid prototyping of biomaterials*. In: NARAYAN, R. (Ed.). *Rapid Prototyping of Biomaterials*. Woodhead Publishing, 1–15. <https://doi.org/10.1533/9780857097217.1>
- Cohen, D. L., Lipton, J. I., Cutler, M., Coulter, D., Vesco, A., & Lipson, H. (2009). *Hydrocolloid Printing: A Novel Platform for Customized Food Production*. <https://doi.org/10.26153/tsw/15154>
- Corrochano, A. R., Yunus Sariçay, Arranz, E., Kelly, P. M., Vitaly Buckin, & Giblin, L. (2019). Comparison of antioxidant activities of bovine whey proteins before and after simulated gastrointestinal digestion. *Journal of Dairy Science*, 102(1), 54–67. <https://doi.org/10.3168/jds.2018-14581>
- Çalışkan, C. İ. (2019). Reviving Ottoman bird palaces and retro approach with additive manufacturing method. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, 14, e00115. <https://doi.org/10.1016/j.daach.2019.e00115>
- Dankar, I., Haddarah, A., El Omar, F., Sepulcre, F., & Pujolà, M. (2018). Assessing the microstructural and rheological changes induced by food additives on potato puree. *Food Chemistry*, 240, 304–313. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.07.121>
- Duarte, L. C., Figueredo, F., Cyro L.S. Chagas, Cortón, E., & Wendell K.T. Coltro. (2024). A review of the recent achievements and future trends on 3D printed microfluidic devices for bioanalytical applications. *Analytica Chimica Acta*, 342429–342429. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2024.342429>
- Enyan, M., Nii, J., Eliasu Issaka, & Abban, O. J. (2024). Advances in fused deposition modeling on process, process parameters, and multifaceted industrial application: a review. *Engineering Research Express*, 6(1), 012401–012401. <https://doi.org/10.1088/2631-8695/ad32f6>
- Er, Y., Onur Güler, Abid Ustaoglu, Gökhan Hekimoğlu, Ahmet Sarı, Serkan Subaşı, Osman Gencil, & Muhammed Maraşlı. (2024). Characterisation and Energy Storage Performance of 3D Printed-Photocurable Resin/Microencapsulated Phase Change Material Composite. *Thermal Science and Engineering Progress*, 102381–102381. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2023.102381>
- Erünsal, S. C., Basturk, Z. S., Canturkoglu, I., & Öztürk, H. I. (2023). Development of 3D printed dark chocolate sweetened with carob extract. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 34, 100794–100794. <https://doi.org/10.1016/j.ijgfs.2023.100794>
- Ferreira, V. F., Silva, F. de C. da, & Ferreira, P. G. (2013). Carboidratos como fonte de compostos para a indústria de química fina. *Química Nova*, 36(10), 1514–1519. <https://doi.org/10.1590/s0100-40422013001000006>
- Fennema, O. R., Damodaran, S., & Parkin, K. L. (2010). *Química de alimentos de Fennema*. Porto Alegre: Artmed.
- Foggiatto, J. A., Ahrens, C. H., Salmoria, G. V., & Pires, A. T. N. (2004). Moldes de ABS construídos pelo processo de modelagem por fusão e deposição para injeção de PP e PEBD. *Polímeros*, 14, 349–353. <https://doi.org/10.1590/S0104-14282004000500013>

- Gholamipour-Shirazi, A., Norton, I. T., & Mills, T. (2019). Designing hydrocolloid based food-ink formulations for extrusion 3D printing. *Food Hydrocolloids*, 95, 161–167. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.04.011>
- Godoi, F. C., Prakash, S., & Bhandari, B. R. (2016). 3d printing technologies applied for food design: Status and prospects. *Journal of Food Engineering*, 179, 44–54. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2016.01.025>
- Godoi, F. C., Bhandari, B. R., Prakash, S., & Zhang, M. (2019). An Introduction to the Principles of 3D Food Printing. *Fundamentals of 3D Food Printing and Applications*, 1–18. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-814564-7.00001-8>
- Gunduz, I. E., McClain, M. S., Cattani, P., Chiu, G. T.-C., Rhoads, J. F., & Son, S. F. (2018). 3D printing of extremely viscous materials using ultrasonic vibrations. *Additive Manufacturing*, 22, 98–103. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.04.029>
- Guo, J., Gu, X., & Meng, Z. (2024). Customized 3D printing to build plant-based meats: Spirulina platensis protein-based Pickering emulsion gels as fat analogs. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 94, 103679–103679. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2024.103679>
- Haghighatjoo, F., Nikkhhah, M., & Rahimpour, M. R. (2024). *Carbohydrate Characterization and Exploitation*. In: Rahimpour, M. R. (ed.). *Encyclopedia of Renewable Energy, Sustainability and the Environment*. 1st ed. Elsevier, p. 553-564. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-93940-9.00190-0>
- Han, D., & Lee, H. (2020). Recent advances in multi-material additive manufacturing: methods and applications. *Current Opinion in Chemical Engineering*, 28, 158–166. <https://doi.org/10.1016/j.coche.2020.03.004>
- Holland, S., Foster, T., Macnaughtan, W., & Tuck, C. (2018). Design and characterisation of food grade powders and inks for microstructure control using 3D printing. *Journal of Food Engineering*, 220, 12–19. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.06.008>
- Huang, J., Qin, Q., & Wang, J. (2020). A Review of Stereolithography: Processes and Systems. *Processes*, 8(9), 1138. <https://doi.org/10.3390/pr8091138>
- Jasanoff, S. (2015). *Future imperfect: Science, technology, and the imaginations of modernity*. In: *Dreamscapes of modernity: Sociotechnical imaginaries and the fabrication of power*. p. 1-33. <https://doi.org/10.7208/9780226276663-001>
- Jesus, N. R. C., & Peres, F. F. F. (2021). *Impressora 3D no ambiente educacional: Um Mapeamento Sistemático da Literatura*. In: CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE SOFTWARE LIVRE E TECNOLOGIAS ABERTAS (LATINOWARE), 18. 94-102, Online. Anais [...]. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Computação. <https://doi.org/10.5753/latinoware.2021.19911>
- Jiménez, M., Romero, L., Domínguez, I. A., Espinosa, M. del M., & Domínguez, M. (2019). Additive Manufacturing Technologies: An Overview about 3D Printing Methods and Future Prospects. *Complexity*, 2019, 1–30. <https://doi.org/10.1155/2019/9656938>
- Jonkers, N., van Dijk, W. J., Vonk, N. H., van Dommelen, J. A. W., & Geers, M. G. D. (2022). Anisotropic mechanical properties of Selective Laser Sintered starch-based food. *Journal of Food Engineering*, 318, 110890. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2021.110890>
- Kruijff, C. G., Huppertz, T., Urban, V. S., & Petukhov, A. V. (2012). Casein micelles and their internal structure. *Advances in Colloid and Interface Science*, 171-172, 36–52. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2012.01.002>
- Kavimughil, M. Maria Leena, Moses, J. A., & Anandharamakrishnan, C. (2022). *3D printed MCT oleogel as a co-delivery carrier for curcumin and resveratrol*. 287, 121616–121616. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2022.121616>
- Kessler, A., Hickel, R., & Reymus, M. (2019). 3D Printing in Dentistry—State of the Art. *Operative Dentistry*, 45(1). <https://doi.org/10.2341/18-229-1>
- Koranne, V., Jonas, O. L. C., Mitra, H., Bapat, S., Ardekani, A. M., Sealy, M. P., Rajurkar, K., & Malshe, A. P. (2022). *Exploring Properties of Edible Hydrolyzed Collagen for 3D Food Printing of Scaffold for Biomanufacturing Cultivated Meat*. 110, 186–191. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.06.034>
- Kruth, J. P., Levy, G., Klocke, F., & Childs, T. H. C. (2007). Consolidation phenomena in laser and powder-bed based layered manufacturing. *CIRP Annals*, 56(2), 730–759. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2007.10.004>
- Kulkarni, A., & Pearce, J. M. (2023). Patent Parasites: Non-Inventors Patenting Existing Open-Source Inventions in the 3-D Printing Technology Space. *Inventions*, 8(6), 141. <https://doi.org/10.3390/inventions8060141>
- Kumar, R., Kumar, M., & Chohan, J. S. (2021). Material-specific properties and applications of additive manufacturing techniques: a comprehensive review. *Bulletin of Materials Science*, 44(3). <https://doi.org/10.1007/s12034-021-02364-y>
- Lanaro, M., Forrestal, D. P., Scheurer, S., Slinger, D. J., Liao, S., Powell, S. K., & Woodruff, M. A. (2017). 3D printing complex chocolate objects: Platform design, optimization and evaluation. *Journal of Food Engineering*, 215, 13–22. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.06.029>
- Li, L., Shi, X., Qi, S., Zhang, X., Fung, H.-Y., Li, Q., & Han, Q. (2024). Strategies, techniques and applications for food authentication based on carbohydrates: A review. *Carbohydrate Polymers*, 344, 122533. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2024.122533>
- Ligon, S. C., Liska, R., Stampfl, J., Gurr, M., & Mülhaupt, R. (2017). Polymers for 3D Printing and Customized Additive Manufacturing. *Chemical Reviews*, 117(15), 10212–10290. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.7b00074>
- Lim, W. S., Kim, H. W., Lee, M. H., & Park, H. J. (2023). Improved printability of pea protein hydrolysates for protein-enriched 3D printed foods. *Journal of Food Engineering*, 350, 111502. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2023.111502>
- Lipton, J., Arnold, D., Nigl, F., Lopez, N., Cohen, D., Norén, N., & Lipson, H. (2010, September 23). *Multi-Material Food Printing with Complex Internal Structure Suitable for Conventional Post-Processing*. Repositories.lib.utexas.edu; University of Texas at Austin. <https://doi.org/10.26153/tsw/15245>
- Liu, J., Dong, S., Jin, X., Wu, P., Yan, S., Liu, X., Tan, Y., Li, C., & Xu, B. (2022). Quality control of large-sized alloy steel parts fabricated by multi-laser selective laser melting (ML-SLM). *Materials & Design*, 223, 111209. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.111209>

- Liu, L., & Ciftci, O. N. (2021). Effects of high oil compositions and printing parameters on food paste properties and printability in a 3D printing food processing model. *Journal of Food Engineering*, 288, 110135. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.110135>
- Liu, Z., & Zhang, M. (2019). *3D Food Printing Technologies and Factors Affecting Printing Precision*. Godoi, F. C., Bhandari, B. R., Prakash, S., Zhang, M. (ed.) *Fundamentals of 3D Food Printing and Applications*, 19–40. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-814564-7.00002-x>
- Liu, Z., Zhang, M., Bhandari, B., & Wang, Y. (2017). 3D printing: Printing precision and application in food sector. *Trends in Food Science & Technology*, 69, 83–94. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.08.018>
- Long, J., Gholizadeh, H., Lu, J., Bunt, C., & Seyfoddin, A. (2016). Review: Application of Fused Deposition Modelling (FDM) Method of 3D Printing in Drug Delivery. *Current Pharmaceutical Design*, 22(999), 1–1. <https://doi.org/10.2174/1381612822666161026162707>
- Lu, Y., Rai, R., & Nitin Nitin. (2023). Image-based assessment and machine learning-enabled prediction of printability of polysaccharides-based food ink for 3D printing. *Food Research International*, 173, 113384–113384. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.113384>
- Lupton, D. (2017). “Download to delicious”: Promissory themes and sociotechnical imaginaries in coverage of 3D printed food in online news sources. *Futures*, 93, 44–53. <https://doi.org/10.1016/j.futures.2017.08.001>
- Malaghini, C. M. E., Ferreira, B. C. F., Pierezan, M. D., Manassi, C. F., & Verruck, S. (2021). Farinha de insetos como fonte alternativa de proteínas em produtos de cereais impressos em 3D. *Avanços Em Ciência E Tecnologia de Alimentos - Volume 5*, 188–202. <https://doi.org/10.37885/211106838>
- Malone, E., & Lipson, H. (2007). Fab@Home: the personal desktop fabricator kit. *Rapid Prototyping Journal*, 13(4), 245–255. <https://doi.org/10.1108/13552540710776197>
- Mantihal, S., Prakash, S., Godoi, F. C., & Bhandari, B. (2017). Optimization of chocolate 3D printing by correlating thermal and flow properties with 3D structure modeling. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 44, 21–29. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2017.09.012>
- Martini, D., Del Bo', C., & Cavaliere, A. (2019). *Current legislation in the European context: a focus on food labeling, novel foods, nutrition, and health claims*. In: Bagghi, D. (ed.). *Nutraceutical and Functional Food Regulations in the United States and around the World (Third Edition)*. Academic Press. 253–265. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816467-9.00018-6>
- Mattos, P. C. (2015). Tipos de revisão de literatura. Botucatu. Disponível em: <http://www.ip.usp.br/porta1/images/biblioteca/revisao.pdf>.
- Mazzoli, A. (2012). Selective laser sintering in biomedical engineering. *Medical & Biological Engineering & Computing*, 51(3), 245–256. <https://doi.org/10.1007/s11517-012-1001-x>
- Montoya, J., Medina, J., Molina, A., Gutiérrez, J., Rodríguez, B., & Marín, R. (2021). Impact of viscoelastic and structural properties from starch-mango and starch-arabinoxylans hydrocolloids in 3D food printing. *Additive Manufacturing*, 39, 101891. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.101891>
- Miranda Morandini, M., & Del Vechio, G. H. (2020). Impressão 3D, tipos e possibilidades. *Revista Interface Tecnológica*, 17(2), 67–77. <https://doi.org/10.31510/infa.v17i2.866>
- Moreira, A. S. (2022). Classificação de proteínas expostas na superfície com Random Forest. Trabalho de conclusão de curso (Ciência da Computação). Universidade Federal de Uberlândia, 53 p.
- Msallem, B., Sharma, N., Cao, S., Halbeisen, F. S., Zeilhofer, H.-F., & Thieringer, F. M. (2020). Evaluation of the Dimensional Accuracy of 3D-Printed Anatomical Mandibular Models Using FFF, SLA, SLS, MJ, and BJ Printing Technology. *Journal of Clinical Medicine*, 9(3), 817. <https://doi.org/10.3390/jcm9030817>
- Nadagouda, M. N., Ginn, M., & Rastogi, V. (2020). A review of 3D printing techniques for environmental applications. *Current Opinion in Chemical Engineering*, 28, 173–178. <https://doi.org/10.1016/j.coche.2020.08.002>
- Neamah, H. A., & Tandio, J. (2024). Towards the development of foods 3D printer: Trends and technologies for foods printing. *Heliyon*, e33882–e33882. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e33882>
- Nei, D., & Sasaki, T. (2023). Applicability of defatted soybean flours to 3D food printer: Effect of milling methods on printability and quality of 3D-printed foods. *Journal of Food Engineering*, 337, 111237. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2022.111237>
- Nelson, D. L., & Cox, M. M. (2022) *Princípios de bioquímica de Lehninger*. Artmed Editora, p. 100-218.
- Noort, M. W. J. (2016). *Method for the production of an edible object using SLS*. WO Patent, 2016085344(2).
- Oliveira, J. E. D., & Marchini, J. E. (1998). *Ciências Nutricionais*. São Paulo: Sarvier, 403 p.
- Padhiary, M., Barbhuiya, J. A., Roy, D., & Roy, P. (2024). 3D printing applications in smart farming and food processing. *Smart Agricultural Technology*, 9, 100553. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100553>
- Pateiro, M., Domínguez, R., Munekata, P. E. S., Barba, F. J., & Lorenzo, J. M. (2019). *Lipids and fatty acids*. In: Barba, F. J., Saraiva, J. M. A., Cravotto, G., Lorenzo, J. M. (Eds.). *Innovative Thermal and Non-Thermal Processing, Bioaccessibility and Bioavailability of Nutrients and Bioactive Compounds*. Woodhead Publishing Series in Food Science, Technology and Nutrition, Woodhead Publishing, 107-137. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814174-8.00004-4>
- Periard, D., Schaal, N., & Schaal, M. (2007). *Printing food*. In: *Proceedings of the 18th solid freeform fabrication symposium*, Austin, TX, EUA, 564-574.
- Pereira, A. S., Shitsuka, D. M., Parreira, F. J., & Shitsuka, R. (2018). *Metodologia da pesquisa científica*. Santa Maria, RS: Universidade Federal de Santa Maria. <https://www.ufsm.br/publicacoes/metodologia>.

- Portanguen, S., Tournayre, P., Sicard, J., Astruc, T., & Mirade, P.-S. (2019). Toward the design of functional foods and biobased products by 3D printing: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 86, 188–198. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.02.023>
- Reche, C., Mónica Umaña, Dalmau, E., Carcel, J. A., & Eim, V. (2024). Improving 3D printed food characteristics by using mushroom by-products and olive oil in the formulation. *LWT*, 202, 116238–116238. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2024.116238>
- Ross, M. M., Burke, R. M., & Kelly, A. L. (2021). *3D Printing of Food*. Burke, R. M., Kelly, A. L., Lavelle, C., & Kientza, H. T. vo (Eds.). Handbook of Molecular Gastronomy. CRC Press, 605-618. <https://doi.org/10.1201/9780429168703>
- Ross, M. M., Crowley, S. V., & Kelly, A. L. (2022). Applications of micellar casein concentrate in 3D-printed food structures. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 82, 103182. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2022.103182>
- Rother, E. T. (2007). Revisão sistemática X revisão narrativa. *Acta Paulista de Enfermagem*, 20(2), v-vi. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0103-21002007000200001>.
- Rubén Domínguez, Pateiro, M., Purriños, L., Paulo E.S. Munekata, Echegaray, N., & Lorenzo, J. M. (2022). Introduction and classification of lipids. *Elsevier eBooks*, 1–16. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-823371-9.00018-6>
- Sachlos, E. (2003). Novel collagen scaffolds with predefined internal morphology made by solid freeform fabrication. *Biomaterials*, 24(8), 1487–1497. [https://doi.org/10.1016/s0142-9612\(02\)00528-8](https://doi.org/10.1016/s0142-9612(02)00528-8)
- Santos, C. S. (2014). *Desenvolvimento de uma nova metodologia sintética para a hidrólise quimiosseletiva de O-glicosídeos 2,3-insaturados*. Trabalho de conclusão de curso (Licenciatura em Química), Universidade Federal de Campina Grande, 70 p.
- Scheele, S. C., Binks, M., Christopher, G., Maleky, F., & Egan, P. F. (2023). Printability, texture, and sensory trade-offs for 3D printed potato with added proteins and lipids. *Journal of Food Engineering*, 351, 111517. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2023.111517>
- Shahbazi, M., Jäger, H., & Ettelaie, R. (2021). Application of Pickering emulsion and 3D printing for personalized nutrition. Part II: Functional properties of reduced-fat 3D printed cheese analogues. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 126760. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2021.126760>
- Sharma, R., Chandra Nath, P., Kumar Hazarika, T., Ojha, A., Kumar Nayak, P., & Sridhar, K. (2024). Recent advances in 3D printing properties of natural food gels: Application of innovative food additives. *Food Chemistry*, 432, 137196. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.137196>
- Shen, D., Zhang, M., Mujumdar, A. S., & Li, J. (2022). Advances and application of efficient physical fields in extrusion based 3D food printing technology. *Trends in Food Science & Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.11.017>
- Shigi, R., & Seo, Y. (2024). Acceptance of 3D printed foods among senior consumers in Japan. *Food Quality and Preference*, 118, 105213–105213. <https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2024.105213>
- Shirazi, S. F. S., Gharekhani, S., Mehrali, M., Yarmand, H., Metselaar, H. S. C., Kadri, N. A., Engineering, N. A. A. O. (2015). A review on powder-based additive manufacturing for tissue engineering: selective laser sintering and inkjet 3D printing. *ProQuest*. <https://doi.org/10.1088/1468-6996/16/3/033502>
- Shuai, X., Li, Y., Zhang, Y., Wei, C., Zhang, M., & Du, L. (2024). Gelation of whole macadamia butter by different oleogelators affects the physicochemical properties and applications. *LWT*, 198, 115961. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2024.115961>
- Silva, L. R. & Vilela, D. M. (2019). Tecnologia de chá e seus processos: uma revisão. *Revista UNINGÁ Review*, 34(2), 39-50.
- Singh, M., Trivedi, N., Enamala, M. K., Kuppam, C., Parikh, P., Nikolova, M. P., & Chavali, M. (2021). Plant-based meat analogue (PBMA) as a sustainable food: a concise review. *European Food Research and Technology*, 247. <https://doi.org/10.1007/s00217-021-03810-1>
- Smetana, S., Ashtari Larki, N., Pernutz, C., Franke, K., Bindrich, U., Toepfl, S., & Heinz, V. (2018). Structure design of insect-based meat analogs with high-moisture extrusion. *Journal of Food Engineering*, 229, 83–85. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.06.035>
- Soares, J. M., Santos, M. M. R., Candido, C. J., Santos, E. F. dos, & Novello, D. (2017). Cookies adicionados de farinha de jatobá: composição química e análise sensorial entre crianças. *Revista Brasileira de Pesquisa Em Saúde/Brazilian Journal of Health Research*, 18(3), 74–82. <https://doi.org/10.21722/rbps.v18i3.15746>
- Song, Y., Ghafari, Y., Asefnejad, A., & Toghraie, D. (2024). An overview of selective laser sintering 3D printing technology for biomedical and sports device applications: Processes, materials, and applications. *Optics & Laser Technology*, 171, 110459. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2023.110459>
- Su, A., & Al'Aref, S. J. (2018). History of 3D Printing. In: Al'Aref, S. J., Mosadegh, B., Dunham, S., & Min, J. K. (Ed.). *3D Printing Applications in Cardiovascular Medicine*, 1–10. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-803917-5.00001-8>
- Sun, J., Zhou, W., Yan, L., Huang, D., & Lin, L. (2018). Extrusion-based food printing for digitalized food design and nutrition control. *Journal of Food Engineering*, 220, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.02.028>
- Sun, J., Zhou, W., Huang, D., Fuh, J. Y. H., & Hong, G. S. (2015). An Overview of 3D Printing Technologies for Food Fabrication. *Food and Bioprocess Technology*, 8(8), 1605–1615. <https://doi.org/10.1007/s11947-015-1528-6>
- Tang, T., Zhang, M., Bhandari, B., & Li, C. (2024). Personalized transformation of 3D printing for traditional multi-material food with stuffing : A review. *Food Bioscience*, 59, 104112–104112. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2024.104112>
- Tintor, Đ., Ninković, K., Milošević, J., & Polović, N. Đ. (2024). Gaining insight into protein structure via ATR-FTIR spectroscopy. *Vibrational Spectroscopy*, 134, 103726. <https://doi.org/10.1016/j.vibspec.2024.103726>

- Tong, Q., Jiang, Y., Xiao, S., Meng, Y., & Dong, X. (2024). Research on improving the structural stability of surimi 3D printing through laser cooking techniques. *Journal of Food Engineering*, 375, 112075. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2024.112075>
- Tsai, C.-R., & Lin, Y.-K. (2022). Artificial steak: A 3D printable hydrogel composed of egg albumen, pea protein, gellan gum, sodium alginate and rice mill by-products. *Future Foods*, 5, 100121. <https://doi.org/10.1016/j.fufo.2022.100121>
- Ulloa, M., Nunes-Nesi, A., da Fonseca-Pereira, P., Poblete-Grant, P., Reyes-Díaz, M., & Cartes, P. (2021). The effect of silicon supply on photosynthesis and carbohydrate metabolism in two wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars contrasting in response to phosphorus nutrition. *Plant Physiology and Biochemistry*, 169, 236–248. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.11.022>
- Valino, A. D., Dizon, J. R. C., Espera, A. H., Chen, Q., Messman, J., & Advincula, R. C. (2019). Advances in 3D printing of thermoplastic polymer composites and nanocomposites. *Progress in Polymer Science*, 98, 101162. <https://doi.org/10.1016/j.propolymsci.2019.101162>
- Venkatachalam, A., Balasubramaniam, A., Wilms, P. F. C., Zhang, L., & Schutyser, M. A. I. (2023). Impact of varying macronutrient composition on the printability of pea-based inks in extrusion-based 3D food printing. *Food Hydrocolloids*, 142, 108760. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.108760>
- Voon, S. L., An, J., Wong, G., Zhang, Y., & Chua, C. K. (2019). 3D food printing: a categorised review of inks and their development. *Virtual and Physical Prototyping*, 14(3), 203–218. <https://doi.org/10.1080/17452759.2019.1603508>
- Vukušić Pavičić, T., Grgić, T., Ivanov, M., Novotni, D., & Herceg, Z. (2021). Influence of Flour and Fat Type on Dough Rheology and Technological Characteristics of 3D-Printed Cookies. *Foods (Basel, Switzerland)*, 10(1), 193. <https://doi.org/10.3390/foods10010193>
- Wang, X., Zhang, M., Mujumdar, A. S., & Li, J. (2023). Easy-to-swallow mooncake using 3D printing: Effect of oil and hydrocolloid addition. *Food Research International*, 164, 112404. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.112404>
- Wawryniuk, Z., Brancewicz-Steinmetz, E., & Sawicki, J. (2024). Revolutionizing transportation: an overview of 3D printing in aviation, automotive, and space industries. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. <https://doi.org/10.1007/s00170-024-14226-y>
- Wen, Y., Chao, C., Che, Q. T., Kim, H. W., & Park, H. J. (2023). Development of plant-based meat analogs using 3D printing: Status and opportunities. *Trends in Food Science & Technology*, 132, 76–92. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.12.010>
- Wu, D., Wu, W., Zhang, N., Soladoye, O. P., Aluko, R. E., Zhang, Y., & Fu, Y. (2024). Tailoring soy protein/corn zein mixture by limited enzymatic hydrolysis to improve digestibility and functionality. *Food Chemistry*, X, 23, 101550–101550. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.101550>
- Xie, D., Hu, H., Huang, Q., & Lu, X. (2023). Development and characterization of food-grade bigel system for 3D printing applications: Role of oleogel/hydrogel ratios and emulsifiers. 139, 108565–108565. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.108565>
- Xu, D., Liu, Z., An, Z., Hu, L., Li, H., Mo, H., & Subrota Hati. (2023). Incorporation of probiotics into 3D printed Pickering emulsion gel stabilized by tea protein/xanthan gum. *Food Chemistry*, 409, 135289–135289. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.135289>
- Xu, M., Xu, Y., Ji, S., Amel Thanina Amrouche, Li, Y., Zhou, Z., Shen, J., Li, K., & Lu, B. (2024). Investigation of the 3D printability of modified starch-based inks and their formation mechanism: Application in ice cream. *Food Hydrocolloids*, 154, 110038–110038. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2024.110038>
- You, S., Huang, Q., & Lu, X. (2023). Development of fat-reduced 3D printed chocolate by substituting cocoa butter with water-in-oil emulsions. *Food Hydrocolloids*, 135, 108114. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2022.108114>
- Yun, J. S., Park, T.-W., Jeong, Y. H., & Cho, J. H. (2016). Development of ceramic-reinforced photopolymers for SLA 3D printing technology. *Applied Physics A*, 122(6). <https://doi.org/10.1007/s00339-016-0157-x>
- 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. *Carbohydrate Polymers*, 294, 119763. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2022.119763>
- Zhang, J. Y., Pandya, J. K., McClements, D. J., Lu, J., & Kinchla, A. J. (2021). Advancements in 3D food printing: a comprehensive overview of properties and opportunities. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 1–18. <https://doi.org/10.1080/10408398.2021.1878103>
- Zheng, L., Li, D., Wang, Y., & Wang, L. (2025). Co-regulation of gelatin content and Hofmeister effect on 3D-printed high internal phase emulsion gel characteristics for resveratrol delivery. *Food Hydrocolloids*, 158, 110574. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2024.110574>
- Zheng, Z., Zhang, M., & Liu, Z. (2021). Investigation on evaluating the printable height and dimensional stability of food extrusion-based 3D printed foods. *Journal of Food Engineering*, 306, 110636. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2021.110636>
- Zhong, Y., Wang, B., Weiqiao Lv, Wu, Y., Yinqiao Lv, & Sheng, S. (2024). Recent research and applications in lipid-based food and lipid-incorporated bioink for 3D printing. *Food Chemistry*, 458, 140294–140294. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.140294>
- Zhu, J., Wu, P., Chao, Y., Yu, J., Zhu, W., Liu, Z., & Xu, C. (2022). Recent advances in 3D printing for catalytic applications. *Chemical Engineering Journal*, 433, 134341. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.134341>
- Zhu, S., Vazquez Ramos, P., Heckert, O. R., Stieger, M., van der Goot, A. J., & Schutyser, M. (2022). Creating protein-rich snack foods using binder jet 3D printing. *Journal of Food Engineering*, 332, 111124. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2022.111124>
- Zhu, S., Ruiz de Azua, I. V., Feijen, S., van der Goot, A. J., Schutyser, M., & Stieger, M. (2021). How macroscopic structure of 3D printed protein bars filled with chocolate influences instrumental and sensory texture. *LWT*, 151, 112155. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112155>
- Zub, K., Hoepfener, S., & Schubert, U. S. (2022). Inkjet Printing and 3D Printing Strategies for Biosensing, Analytical and Diagnostic Applications. *Advanced Materials*, 2105015. <https://doi.org/10.1002/adma.202105015>