

DESENVOLVIMENTO DE FORMULAÇÕES À BASE DE CONCENTRADO PROTEICO DE CÉLULAS CULTIVADAS E PROTEÍNAS VEGETAIS PARA IMPRESSÃO 3D DE ALIMENTOS

Mariana Tiene Britto¹; Tatiana Beatris Tribess²

¹Aluna de Iniciação Científica do Instituto Mauá de Tecnologia (IMT);

² Professora do Instituto Mauá de Tecnologia (IMT).

Resumo

*O desenvolvimento de tintas comestíveis para impressão 3D é intrinsecamente dependente da otimização de suas características de fluidez e extrusão para garantir a estabilidade da estrutura. O estudo iniciou-se com a caracterização de uma formulação baseada em proteínas vegetais, óleos, água e um sistema de hidrocolóides e aditivos, visando estabelecer um material de referência para análogos cárneos. Esta composição serviu como a base inicial para os ensaios de impressão 3D, sendo posteriormente reformulada para incluir um concentrado proteico de levedura (*Saccharomyces cerevisiae*) produzido via lise enzimática otimizada, e fornecido pelo Instituto SENAI de Inovação em Biomassa – MS. As amostras iniciais foram submetidas à impressão 3D por extrusão acionada por pistão, e o material impresso foi avaliado em relação à sua estrutura, precisão da impressão, estabilidade, propensão à sinérese, entre outras. Os ensaios de impressão 3D foram repetidos com as duas formulações. Os resultados confirmam a viabilidade das formulações vegetais como tinta comestível e abrem caminhos promissores para a incorporação de bioprodutos na impressão 3D, porém, a pesquisa aponta para a necessidade de estudos adicionais para maximizar o desempenho e a palatabilidade dessas novas formulações.*

Introdução

O panorama alimentar global contemporâneo é marcado pela busca incessante por soluções que enderecem a crescente demanda por proteínas e, simultaneamente, mitiguem os impactos ambientais associados à produção pecuária tradicional (Oliveira et al., 2023). Neste cenário, o desenvolvimento de proteínas alternativas, que englobam fontes vegetais e a tecnologia de cultivo celular, tornou-se um dos focos de pesquisa em ciência e tecnologia de alimentos (Nolasco et al., 2021).

As proteínas vegetais isoladas, como as derivadas de soja e ervilha, são amplamente reconhecidas por seu valor nutricional, atuando como ingredientes-base para a formulação de análogos de carne (Nolasco et al., 2021; Pereira et al., 2023). Contudo, a estruturação desses ingredientes em produtos que mimetizem a complexidade sensorial e a textura fibrosa da carne animal permanece um desafio tecnológico. Paralelamente, a carne cultivada, obtida a partir do crescimento de células animais em biorreatores, representa a vanguarda da biotecnologia alimentar, prometendo menor uso de recursos naturais e redução significativa nas emissões de gases de efeito estufa (Revista Meio Ambiente, 2023; Vale et al., 2020).

Além do uso de células de origem animal, a biomassa de levedura cultivada surge como uma alternativa promissora e de menor impacto ambiental. Concentrados proteicos obtidos de *Saccharomyces cerevisiae* alcançam teores superiores a 75% de proteína e apresentam composição rica em aminoácidos essenciais, podendo ser aplicado em análogos cárneos com desempenho tecnológico comparável. Essa abordagem microbiana reduz barreiras éticas e regulatórias associadas à carne cultivada, pois não depende do uso de células de origem animal, mantendo a viabilidade biotecnológica e nutricional (Lesaffre, 2020; FAO, 2023).

A impressão 3D de alimentos por extrusão é uma tecnologia disruptiva que oferece o controle preciso sobre a estrutura do produto, permitindo a personalização da forma, da textura e da composição nutricional em escala de camada (Singhal et al., 2020). O sistema de impressão de extrusão por pistão opera forçando o material pastoso através de uma seringa, depositando-o sequencialmente em camadas

finas para construir a estrutura tridimensional. Para a aplicação bem-sucedida, a formulação da tinta comestível deve apresentar características reológicas adequadas para garantir a estabilidade estrutural e a qualidade do produto (Gholamipour-Shirazi et al., 2020), exigindo fluidez e extrusão ajustadas, características cruciais para assegurar que o material seja depositado com precisão e mantenha a integridade estrutural após a extrusão (Lima, 2024).

Desta forma, o presente estudo estabelece como objetivo a investigação do desempenho e do comportamento da substituição parcial dos ingredientes da formulação base por concentrados proteicos cultivados no desenvolvimento de análogos cárneos impressos em 3D. Este estudo dá continuidade ao trabalho desenvolvido por Bertucci (2024) e parte da formulação de análogo cárneo estudado por ela.

Materiais e Métodos

As tintas foram elaboradas com o hidrocoloide goma guar (Pre-Hydrated® Guar Gum 8/24 Powder, Ingredion, Brasil), amido de milho modificado (S) (National® 465, SP, Ingredion, Brasil), isolado de proteína de soja (P) (Supro® 500e, IFF, SP, Brasil), pó de beterraba 100% Pura (Armazém Bezerra, Brasil), espinafre desidratado em pó (Ingredientes online, Brasil), isolado de proteína de ervilha (R & S Blumos, Brasil), óleo de coco (Copra®, Brasil), óleo vegetal de girassol (Liza®, Brasil), cacau em pó (Genuine®, Brasil), carboximetilcelulose (Denver Especialidades, Brasil), glutamato monossódico (Liotécnica®, Brasil) aroma de carne (Vogler® 20533784, Kerry, Brasil), sal (Cisne®, Brasil) e água destilada conforme as formulações descritas na Tabela 1.

Tabela 1- Composição das formulações padrão e com a adição do concentrado proteico.

Ingredientes	Formulação Padrão (%)	Formulação Concentrado Proteico (%)
Água destilada	37.35	37.35
Goma guar	0.62	0.62
Amido modificado	2.45	2.45
Beterraba em pó	0.49	0.49
Proteína de soja isolada	9.61	7.70
Proteína de ervilha	17.04	13.63
Concentrado proteico celular	-	5.33
Óleo de coco	13.37	13.37
Óleo vegetal de girassol	12.88	12.88
Cacau em pó	2.97	2.97
Espinafre em pó	0.49	0.49
Carboximetilcelulose (CMC)	0.25	0.25
Sal marinho	1.19	1.19
Glutamato monossódico	0.30	0.30
Aroma de carne	0.49	0.49
Total	100.0	100.0

Para o preparo de 200 g de tinta, a goma guar juntamente com o espinafre em pó foram pesados e solubilizada em água destilada, sem agitação. Após 24h de hidratação da mistura com hidrocolóides, os demais ingredientes também foram adicionados à mistura, homogeneizando manualmente, pois à alta consistência da mistura demonstra que seria necessário um equipamento com maior capacidade de rotação, com auxílio de uma espátula de silicone. Posteriormente, toda a mistura foi transferida para as seringas de 10 ml que foram acopladas à impressora 3D acionada por pistão Genesis II - 3DBS (3D Biotechnology Solutions, Brasil). Para a formulação com a implementação do concentrado proteico celular, o processo foi o mesmo, apenas alterando a quantidade de proteína em pó, sendo 20% do total de proteína substituído pelo concentrado proteico de células cultivadas, quantidade esta estabelecida a partir do resultado sensorial de testes preliminares.

O insumo originalmente previsto para ser utilizado no trabalho, aglomerados celulares de origem animal fornecidos pela empresa Cellva®, foi substituído por concentrado proteico de células cultivadas de levedura (*Saccharomyces cerevisiae*), em decorrência da interrupção da produção comercial do material pela empresa Cellva® no início de 2025. Essa substituição manteve a coerência científica do projeto, uma vez que o novo insumo também se enquadra como fonte celular cultivada, de origem microbiana, e apresenta alta concentração proteica.

O concentrado proteico de células cultivadas de levedura (*Saccharomyces cerevisiae*) foi fornecido pelo Instituto SENAI de Inovação em Biomassa e obtido pelo processo que compreende as etapas de reativação da biomassa, plasmólise térmica e lise enzimática controlada, seguidas de centrifugação e lavagem para separação da fração insolúvel rica em proteínas. Após a separação do pellet, o concentrado proteico de levedura foi espalhado em formas e aquecido em forno de lastro (Pratica, Technipan) por 20 min, à 170 °C, sendo utilizado como substituto parcial (20%) das proteínas vegetais nas formulações testadas neste estudo. O concentrado apresentou teor médio de proteína de $75 \pm 2\%$ e umidade de $9,4 \pm 0,9\%$.

A Figura 1 ilustra o equipamento utilizado para os ensaios: o processo de manufatura aditiva por extrusão foi conduzido utilizando a impressora 3D acionada por pistão, modelo Genesis II (3D Biotechnology Solutions – 3DBS, Brasil).



Figura 1 - Impressora 3D acionada por pistão Genesis II -3DBS

A Figura 2 apresenta o fluxograma para a realização da formulação padrão do projeto, incluindo toda a etapa pré-impressão 3D.

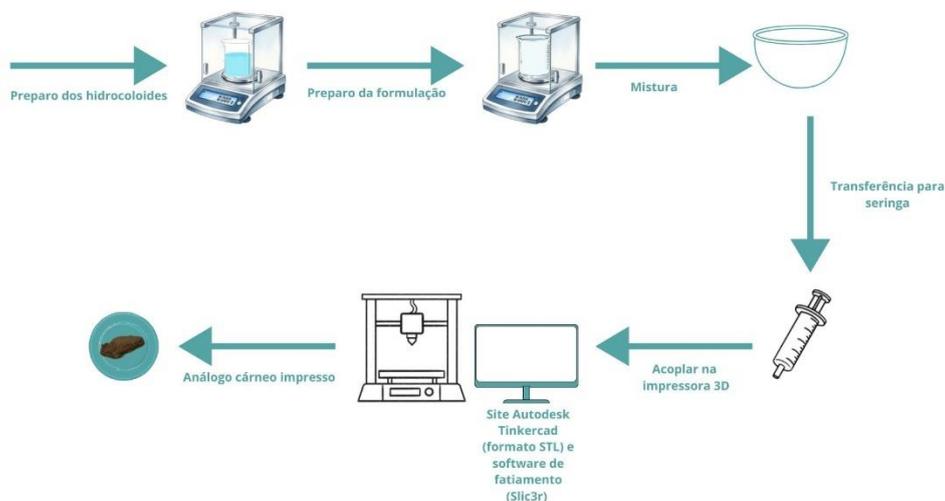


Figura 2 - Fluxograma do processo

O ensaio para a determinação da altura máxima de camada foi realizado em triplicata, seguindo a metodologia estabelecida por Ariei e Nishikawa (2023). Este teste é crucial para avaliar a estabilidade estrutural e a capacidade de suporte da tinta comestível sob o próprio peso durante o empilhamento. Para a execução, foi utilizado um *design* padrão de cilindro com 28 mm de diâmetro. A altura máxima é definida como o ponto em que a estrutura impressa apresenta tombamento, indicando o limite de resistência mecânica do material extrudado.

A avaliação da capacidade de impressão (“*printability*”) das diferentes formulações é fundamental para determinar sua adequação ao processo de impressão 3D por extrusão, sendo conduzida em triplicata, empregando a metodologia detalhada por Shi et al. (2023). O procedimento experimental utilizou seringas preenchidas com 10 mL de amostra, as quais são acopladas a ponteiros com 1,2 mm de diâmetro, com a impressora operando a uma velocidade controlada de 10 mm/s. Este ensaio visa analisar o desempenho da tinta sob condições padronizadas, verificando a fluidez e regularidade do filamento extrudado, a ausência de obstrução do bocal e a continuidade do depósito, fatores essenciais para a integridade da camada e a otimização da formulação para a incorporação dos aglomerados celulares cultivados.

A precisão de impressão é um parâmetro crítico na manufatura aditiva de alimentos, quantificando a fidelidade dimensional com que a formulação reproduz a geometria do modelo digital. A análise foi realizada em triplicata pela impressão de um modelo cuboide com 15 mm e densidade de preenchimento de 70% (Wang et al., 2024). Os parâmetros de extrusão utilizados foram determinados previamente (Sviech, 2021) e foram de 1,2 mm o diâmetro do bico da seringa, velocidade de impressão de 1,5 mm/s e velocidade de retração de 1,5 mm/s. Para a determinação da precisão final, as imagens foram analisadas no programa Image J (National Institute of Mental Health, EUA) para obter as dimensões.

O ensaio de sinérese é um indicador crítico da estabilidade de géis, sendo fundamental para a caracterização da qualidade das tintas comestíveis. No contexto da impressão 3D, a sinérese excessiva pode levar à desidratação e à perda da estabilidade estrutural das camadas depositadas, prejudicando a precisão dimensional (CHEN et al., 2019). O grau de sinérese foi determinado em triplicata, com base na metodologia descrita por Alvarez et al. (2023). Um cilindro, medindo 1 cm de diâmetro e 2 cm de altura, foi impresso, pesado para registro da massa inicial, e posteriormente armazenado sob condições controladas por um período de 12 horas a 6 °C. Após o condicionamento, a massa final foi registrada novamente, sendo o grau de sinérese calculado pela diferença percentual entre a massa inicial e a massa final, o que reflete a perda de líquido ocorrida.

A determinação da atividade de água das formulações foi realizada utilizando o equipamento Aqualab 4TE (Meter, Brasil), seguindo procedimentos analíticos padronizados. A determinação do teor de cinzas das formulações impressas foi realizada em triplicata, seguindo os procedimentos padrão descritos pelo Instituto Adolfo Lutz (2008).

O teor de umidade é fundamental na caracterização de alimentos, quantificando a massa total de água presente na amostra. A metodologia utilizada foi a de perda por dessecação em estufa a vácuo (Instituto Adolfo Lutz, 2008), que é ideal para materiais sensíveis ao calor.

O ensaio para a determinação do teor de proteínas é crucial para a caracterização nutricional das formulações, pois permite a quantificação do conteúdo proteico total das amostras, essencial para comparar o valor nutricional da formulação padrão, com a versão enriquecida com aglomerados celulares cultivados. O método empregado é o Método Kjeldahl adaptado, seguindo as diretrizes do Instituto Adolfo Lutz (2008).

Para a caracterização completa dos análogos cárneos e para simular as condições de consumo, a avaliação da textura e da cor das formulações padrão e com células cultivadas foi realizada após a cocção. O procedimento de cozimento foi padronizado, expondo as amostras a uma temperatura de 160 °C por um período aproximado de 4 minutos, sendo a análise dessas propriedades sensoriais pós-cocção fundamental para determinar a eficácia da incorporação dos aglomerados celulares na replicação das características organolépticas da carne tradicional.

O perfil de textura (TPA) das formulações foi determinado em triplicata utilizando um analisador de textura TA-XT2i (Stable Micro Systems, Inglaterra), com o objetivo de quantificar as

propriedades mecânicas dos análogos cárneos, seguindo o protocolo adaptado de Libório et al. (2019). As amostras, padronizadas em cilindros de 5 cm de diâmetro e 3 cm de altura, foram submetidas a uma compressão biaxial de dois ciclos a 22 °C, atingindo 40% da altura inicial com uma sonda (P36/R) de 3,5 cm de diâmetro e velocidade de 5 mm/s. Os parâmetros avaliados incluíram dureza, elasticidade, coesividade, gomosidade, mastigabilidade e resiliência. Simultaneamente, a cor foi avaliada em triplicata, conforme descrito por Libório et al. (2019), utilizando um espectrofotômetro modelo ColorQuest XE (HunterLab, EUA) para quantificação objetiva no espaço de cor ($L^* a^* b^*$).

Os resultados experimentais foram submetidos à análise estatística para verificar a significância das diferenças encontradas entre as formulações. Utilizou-se a análise de variância (ANOVA), seguida pelo teste de Tukey, para a comparação dos resultados obtidos. Todas as análises estatísticas foram conduzidas no *software* estatístico Minitab® (versão 22.0.0)

Resultados e Discussão

Os resultados obtidos neste estudo permitiram avaliar a influência da substituição parcial das proteínas vegetais pelo concentrado proteico de células cultivadas de levedura sobre as propriedades físico-químicas, estruturais e mecânicas das formulações destinadas à impressão 3D de análogos cárneos. Além disso, possibilitaram comparar o comportamento reológico e de impressão com o trabalho desenvolvido anteriormente por Bertucci (2024), que utilizou formulações análogas. A análise conjunta evidencia a evolução metodológica alcançada nesta nova etapa da pesquisa e o impacto positivo da transição para o uso de biomassa microbiana cultivada.

A etapa de prototipagem do material foi realizada utilizando a impressora 3D. A Figura 3 ilustra o processo de impressão e o análogo cárneo padrão em sua forma final.



Figura 3 - Análogo cárneo padrão impresso

O primeiro aspecto observado foi a redução significativa da sinérese, apresentado na Tabela 2 na formulação com concentrado proteico celular (de 18,8% para 14,9%), indicando maior capacidade de retenção de água e estabilidade do gel. Em comparação, o estudo de Bertucci (2024) relatou sinérese média de 22,4%, evidenciando que o novo sistema proteico apresentou desempenho superior na manutenção da estrutura durante o armazenamento. Essa diferença pode ser atribuída à presença de polipeptídeos de baixo peso molecular e glicoproteínas no concentrado de levedura, que atuam como agentes estabilizantes, interagindo com os hidrocoloides (Chen et al., 2019). O comportamento está de acordo com os resultados reportados por Gholamipour-Shirazi et al. (2020), que destacam o papel da rede proteica no controle da exsudação em matrizes viscoelásticas impressas.

A altura máxima da camada aumentou significativamente com a adição do concentrado proteico celular (de 3,7 mm para 7,3 mm), sugerindo melhor resistência mecânica e coesão estrutural da matriz durante o empilhamento. Em Bertucci (2024), a instabilidade dimensional das amostras foi um dos principais desafios observados, com tendência a colapso acima de 4 mm de altura. Essa melhora reflete o avanço no controle reológico e na interação entre fases proteica e lipídica da formulação atual, o que está em conformidade com os princípios descritos por Singhal et al. (2020).

Tabela 2 - Sinérese, altura máxima e precisão de impressão para tintas alimentícias Padrão e com Concentrado Proteico Celular (CPC)

	Formulação Padrão	Formulação CPC
Sinérese (%)	18,8±0,2 ^A	14,9±0,9 ^B
Altura máxima da camada (mm)	3,7±0,6 ^A	7,3±0,6 ^B
Precisão de impressão (%)	55,1±0,8 ^A	42±2 ^B

*Médias com a mesma letra, na mesma linha, não diferem significativamente (p>0,05)

A altura máxima da camada aumentou significativamente com a adição do concentrado proteico celular (de 3,7 mm para 7,3 mm), sugerindo melhor resistência mecânica e coesão estrutural da matriz durante o empilhamento. Em Bertucci (2024), a instabilidade dimensional das amostras foi um dos principais desafios observados, com tendência a colapso acima de 4 mm de altura. Essa melhora reflete o avanço no controle reológico e na interação entre fases proteica e lipídica da formulação atual, o que está em conformidade com os princípios descritos por Singhal et al. (2020).

A redução da precisão de impressão (de 55,1% para 42%) pode indicar que a nova formulação, apesar da maior estabilidade, apresentou aumento da viscosidade aparente, o que impacta a fluidez do filamento extrudado. Tal comportamento foi também descrito por Aarii & Nishikawa (2023) em sistemas ricos em proteínas parcialmente desnaturadas, nas quais a coesão excessiva compromete o preenchimento homogêneo das camadas. Comparando-se aos resultados de Bertucci (2024), observa-se que o desempenho é semelhante, mas com menor incidência de bloqueios de bico e maior regularidade do fluxo para a amostra CPC, evidenciando melhor compatibilidade entre a fase proteica de levedura e os hidrocoloides utilizados.

A Tabela 3 apresenta os teores de proteína, cinzas, umidade e atividade de água (aw) para as tintas alimentícias Padrão e com Concentrado Proteico Celular (CPC). A análise de composição centesimal revelou teores de proteína semelhantes entre as formulações padrão (22,83%) e com concentrado (21,84%), demonstrando que a substituição parcial não comprometeu o valor nutricional. No presente estudo, a maior pureza proteica do concentrado de levedura (75%) explica a manutenção do teor proteico total.

Tabela 3 - Teores de proteína, cinzas, umidade e atividade de água (aw) para as tintas alimentícias padrão e com Concentrado Proteico Celular (CPC)

	Formulação Padrão	Formulação CPC
Proteínas (%)	22,83±0,75 ^A	21,84±0,26 ^A
Cinzas (%)	3,42±0,04 ^A	3,36±0,03 ^A
Umidade (%)	37,34±0,36 ^A	33,86±0,24 ^B
aw	0,959±0,003 ^A	0,954±0,002 ^A

*Médias com a mesma letra, na mesma linha, não diferem significativamente (p>0,05)

A Figura 4 apresenta as informações nutricionais da formulação do análogo cárneo padrão, cujos valores nutricionais foram determinados com base na Tabela Brasileira de Composição de Alimentos (TACO) e nas quantidades de ingredientes. A tinta alimentar atende aos critérios da RDC nº 429/2020 e da IN nº 75/2020 (ANVISA) para não obrigatoriedade de Rotulagem Nutricional Frontal (FOP) no que diz respeito aos açúcares adicionados (0 g/100 g) e ao sódio (559 mg/100 g), que se encontra abaixo do limite de 600mg por 100g. No entanto, o teor de gorduras saturadas (13,8 g/100 g) excede o limite estabelecido de 6 g por 100 g, resultando na obrigatoriedade de incluir a Rotulagem Nutricional Frontal com a indicação "ALTO EM GORDURA SATURADA" no produto. Ao modificar a formulação, através da substituição parcial dos concentrados proteicos por um Concentrado Proteico Celular (CPC) de 75% de proteína, informações nutricionais apresentadas na Figura 5, a obrigatoriedade da

Rotulagem Nutricional Frontal (FOP) é mantida. O principal fator é o teor de gorduras saturadas, que permanece elevado (15 g/100 g) na formulação modificada, mantendo-se significativamente acima do limite, exigindo a inclusão da tarja mencionada acima. Por outro lado, a substituição pelo CPC resultou em uma melhoria no perfil de sódio, que foi reduzido para 548 mg por 100g de produto.

A diferença entre o percentual de proteína medido na amostra padrão e CPC em laboratório (22,83% e 21,84%, respectivamente) e das informações nutricionais (18% e 16%, respectivamente) obtidas a partir da composição encontrado na Tabela TACO (Tabela Brasileira de Composição de Alimentos) decorre, principalmente, do fato de que a TACO utiliza valores médios obtidos a partir de múltiplas amostras, coletadas sob variadas condições de cultivo, processamento e sazonalidade, que parâmetros que não são padronizados em alimentos.

A Tabela 4 apresenta a comparação da textura entre a formulação Padrão e a formulação enriquecida com o Concentrado Proteico Celular. Os parâmetros de textura mostraram-se estatisticamente semelhantes entre as duas formulações, com tendência à redução de dureza, gomosidade e mastigabilidade na amostra com Concentrado Proteico Celular. Essa suavização indica uma rede estrutural mais homogênea e menos compacta, favorecendo a deformação elástica. Resultados análogos foram relatados por Libório et al. (2019) e Gholamipour-Shirazi et al. (2020), que associam a presença de proteínas solúveis e peptídeos curtos à diminuição da rigidez em géis alimentares. Em comparação à Bertucci (2024), a formulação atual apresentou menor variabilidade nos dados de dureza e elasticidade.

INFORMAÇÃO NUTRICIONAL			
Porções por embalagem: 1			
Porção: 70 g (1 unidade)			
	100 g	70 g	%VD*
Valor energético (kcal)	361	253	13
Carboidratos (g)	10	7	2
Açúcares totais (g)	2	1	
Açúcares adicionados (g)	0	0	0
Proteínas (g)	18	13	26
Gorduras totais (g)	27	19	29
Gorduras saturadas (g)	14	10	49
Gorduras trans (g)	0	0	0
Fibras alimentares (g)	4	3	10
Sódio (mg)	559	391	20

*Percentual de valores diários fornecidos pela porção.

INFORMAÇÃO NUTRICIONAL			
Porções por embalagem: 1			
Porção: 70 g (1 unidade)			
	100 g	70 g	%VD*
Valor energético (kcal)	353	246	13
Carboidratos (g)	8	6	2
Açúcares totais (g)	1	1	
Açúcares adicionados (g)	0	0	0
Proteínas (g)	16	11	26
Gorduras totais (g)	28	19	29
Gorduras saturadas (g)	14	10	49
Gorduras trans (g)	0	0	0
Fibras alimentares (g)	4	3	10
Sódio (mg)	548	384	20

*Percentual de valores diários fornecidos pela porção.

Figura 4 - Informação nutricional tinta alimentar Padrão antes do cozimento, conforme RDC 429/2020 e IN 75/2020 (ANVISA, 2020a, 2020b)

A análise do perfil de textura (TPA) é um fator crucial na avaliação da qualidade de análogos cárneos, pois a inserção desse produto no setor alimentício depende da sua capacidade em mimetizar as propriedades mecânicas e sensoriais. Os parâmetros de textura medidos para o análogo carne padrão e CPC, não apresentaram diferenças significativas. Embora a formulação padrão apresente valores numericamente mais altos para dureza e mastigabilidade o alto desvio padrão, em ambos os grupos impediu que essas diferenças fossem estatisticamente relevantes, demonstrando que seria necessário um maior número de ensaios para garantir a confiabilidade dos resultados.

Tabela 4 - Textura para as tintas alimentícias padrão e com Concentrado Proteico Celular (CPC) após cocção

	Formulação Padrão	Formulação CPC
Dureza	84±25 ^A	51±26 ^A
Elasticidade	0,88±0,03 ^A	0,847±0,009 ^A
Coesividade	0,72±0,05 ^A	0,667±0,006 ^A
Gomosidade	61±21 ^A	34±18 ^A
Mastigabilidade	54±20 ^A	29±15 ^A
Resiliência	0,36±0,02 ^A	0,34±0,01 ^A

*Médias com a mesma letra, na mesma linha, não diferem significativamente (p>0,05)

A análise da cor é um atributo sensorial de grande importância que influencia na aceitação inicial do consumidor pelo produto. A Tabela 5 demonstra que não houve diferenças estatísticas significativas entre todas as coordenadas colorimétricas para ambas as formulações. Os baixos valores de luminosidade (L*) indicam que as tintas tendem para colorações mais escuras. Enquanto os valores positivos de a* e b* conferem uma tonalidade levemente avermelhada e amarelada, respectivamente. Esse comportamento já havia sido descrito por Bertucci (2024) e reforçado por Wang et al. (2022), que demonstraram que pigmentos e aminoácidos redutores presentes na biomassa de levedura participam de reações de Maillard durante o aquecimento, gerando compostos de tonalidade dourada e aroma agradável, sem comprometer a estabilidade da cor.

Tabela 5 - Cor para as tintas alimentícias Padrão e com Concentrado Proteico Celular (CPC)

	Formulação Padrão	Formulação CPC
L*	42±1 ^A	41,3±0,5 ^A
a*	4,2±0,2 ^A	3,9±0,7 ^A
b*	4,9±0,5 ^A	4,4±0,9 ^A

*Médias com a mesma letra, na mesma linha, não diferem significativamente (p>0,05)

Conclusões

O presente estudo demonstrou a viabilidade técnica da substituição parcial de proteínas vegetais por um concentrado proteico de células cultivadas de levedura (*Saccharomyces cerevisiae*) em formulações para impressão 3D de análogos cárneos. Comparando-se aos resultados obtidos no trabalho de Bertucci (2024), a nova formulação evidenciou melhorias significativas quanto à estabilidade mecânica e à redução de sinérese, refletindo o aprimoramento metodológico e o controle reológico.

A substituição das proteínas vegetais pelo insumo microbiano permitiu maior consistência nas propriedades texturais e melhor uniformidade das amostras impressas, sem prejuízo nutricional, o que reforça o potencial tecnológico das proteínas unicelulares em aplicações emergentes da engenharia de alimentos. A continuidade do projeto deverá concentrar-se na otimização das condições de impressão e cocção e na avaliação sensorial, visando desenvolver alimentos personalizados e com menor impacto ambiental, alinhados às tendências globais de biotecnologia e sustentabilidade alimentar.

Referências Bibliográficas

- ALVAREZ. Temperature-controlled 3D printing of dairy structures using cold-renneted protein-fortified milk. *Journal of Food Engineering*, 369, 111892, 2024.
- ARII. Evaluation of printability and rheological behavior of protein-based inks for 3D food printing. *Journal of Food Engineering*, v. 355, p. 111121, 2023.
- BERTUCCI, Bruna Lotti; ANDREOLA, Kaciane; TRIBESS, Tatiana Beatrís; MATUDA, Tatiana Guinoza Matuda. Desenvolvimento de formulações à base de proteínas vegetais para impressão 3D de

alimentos. Relatório de Iniciação Científica. Instituto Mauá de Tecnologia, São Caetano do Sul, 2024.

CHEN, Yifan; ZHANG, Ming; BHANDARI, Bhesh. Stability and rheology of food inks for 3D printing applications: A review. *Trends in Food Science & Technology*, v. 89, p. 1–10, 2019.

FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations. Cell-based food: safety and regulatory aspects. Rome: FAO, 2023. Disponível em: <https://www.fao.org/publications>. Acesso em: 15 nov. 2025.

FENG. Water activity control and its influence on microbial stability and shelf life of foods: a review. *Food Control*, v. 117, p. 107334, 2020.

GHOLAMIPOUR-SHIRAZI, Azarmidokht; KAMLOW, Michael-Alex; NORTON, Ian T.; MILLS, Tom. How to formulate for structure and texture via medium of additive manufacturing - a review. *Foods*, v. 9, n. 4, p. 497, 15 abr. 2020.

LESAFFRE, Philippe; BOUTER, François; DUPONT, Anne-Marie; et al. Métodos para obtenção de proteínas de leveduras e usos de um extrato proteico de leveduras. BR112020021753. Instituto Nacional de Propriedade Industrial (INPI), Brasil, 2020.

LIBÓRIO. Caracterização físico-química e sensorial de hambúrguer elaborado com carne de galinha poedeira. *Revista Científica de Produção Animal*, 20, 53-58.

LIMA, Francisco Jordão Nunes de. Desenvolvimento e avaliação do comportamento reológico de pastas cimentícias para impressão 3D por extrusão. 2024. Dissertação (Mestrado) — Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2024. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3146/tde-29012025-083200/pt-br.php>.

LOURENÇO, Matheus; CLERICI, Maria Teresa Pedrosa Silva; SILVA, Luan Ramos da; NOLASCO, Marcos Vinícius Flores Miranda. Impressão 3D de alimentos: uma revisão sobre a história, funcionalidade e desafios no desenvolvimento de produtos. *Research, Society and Development*, v. 14, n. 1, e1714147902, 2025.

NOLASCO. Impressão 3D de Alimentos: Uma revisão sobre a história, funcionalidade e desafios no desenvolvimento de produtos. *Research, Society and Development*, v. 10, n. 14, p. e333101422002, 2021.

OLIVEIRA, Carlos André Dantas de; MENDONÇA, Lidiane Pinto de.; Carne cultivada: uma alternativa sustentável. *Revista Meio Ambiente e Sustentabilidade*, Curitiba, v. 12, n. 24, 2023.

PEREIRA, Ana Rita; LOPES, Rafael Augusto; MENDONÇA, Lidiane Pinto. Plant-based meat analogues: composition, processing, and nutritional evaluation. *Journal of Food Science and Technology*, v. 60, p. 3314–3325, 2023.

SINGHAL, Somya; RASANE, Prasad; KAUR, Sawinder; GARBA, Umar; BANKAR, Akshay; SINGH, Jyoti; GUPTA, Neeru. 3D food printing: paving way towards novel foods. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, v. 92, n. 3, e20180737, 2020.

VALE, Carlos Fernando; OLIVEIRA, Carlos André Dantas de; MENDONÇA, Lidiane Pinto. Cultured meat and sustainability: an overview of environmental and technological challenges. *Meat Science*, v. 176, p. 108509, 2020.

SVIECH, 2021. Estudo do potencial da mucilagem *Ora-pro-nobis* (*Pereskia aculeata* Miller) como ingrediente na impressão 3D de alimentos. Habilitação (Doutorado em Engenharia de Alimentos) – Universidade Estadual de Campinas, São Paulo.

WANG. Scientometrics and visualized analysis of 3D food printing: A boost to future food customized development. *Food Bioscience*, 103844, 2024.

WANG. Maillard reaction in yeast-derived protein hydrolysates: impact on aroma and color development during thermal processing. *Food Chemistry*, v. 396, 133723, 2022.

BRASIL. Ministério da Saúde. Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA), 2020a. Resolução da Diretoria Colegiada – RDC nº 429, de 08 de outubro de 2020, dispõe sobre a rotulagem nutricional dos alimentos embalados *Diário Oficial da União*, Poder Executivo, Brasília, DF, 13 de out. 2020.

BRASIL. Ministério da Saúde. Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA), 2020b. Resolução da Diretoria Colegiada – IN nº 75, de 08 de outubro de 2020, estabelece os requisitos técnicos para declaração da rotulagem nutricional nos alimentos embalados. *Diário Oficial da União*, Poder Executivo, Brasília, DF, 13 de out. 2020.

IAL - Instituto Adolfo Lutz, 2008. Métodos físico-químicos para análise de alimentos. 4ª ed. (1ª edição

digital).

NÚCLEO DE ESTUDOS E PESQUISAS EM ALIMENTAÇÃO (NEPA). Tabela Brasileira de Composição de Alimentos – TACO. 4. ed. rev. e ampl. Campinas: NEPA-UNICAMP, 2011.