



**JETHRO SUFRA**

**COMPORTAMENTO REOLÓGICO E PROPRIEDADES  
EMULSIFICANTES DE UM SISTEMA MISTO CONSTITUÍDO  
POR PROTEÍNAS DE SORO LÁCTEO E AMIDO**

**LAVRAS – MG  
2022**

**JETHRO SUFRA**

**COMPORTAMENTO REOLÓGICO E PROPRIEDADES EMULSIFICANTES  
DE UM SISTEMA MISTO CONSTITUÍDO POR PROTEÍNAS DE SORO  
LÁCTEO E AMIDO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Alimentos, para a obtenção do título de Mestre.

Prof. Dr. Luiz Ronaldo De Abreu  
Orientador

Prof. Dr. Jaime Vilela De Resende  
Coorientador

Profa. Dra. Joelma Pereira  
Coorientadora

**LAVRAS – MG  
2022**

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Sufra, Jethro.

Comportamento reológico e propriedades emulsificantes de um sistema misto constituído por proteínas de soro lácteo e amido / Jethro Sufra. - 2022.

65 p.

Orientador: Luiz Ronaldo de Abreu.

Coorientadores: Jaime Vilela de Resende, Joelma Pereira .  
Dissertação (Mestrado acadêmico) - Universidade Federal de Lavras, 2022.

Bibliografia.

1. Proteínas de soro lácteo. 2. Amido. 3. Reologia. I. De Abreu, Luiz Ronaldo. II. De Resende, Jaime Vilela. III. Pereira, Joelma. IV. Título.

**JETHRO SUFRA**

**COMPORTAMENTO REOLÓGICO E PROPRIEDADES EMULSIFICANTES DE  
UM SISTEMA MISTO CONSTITUÍDO POR PROTEÍNAS DE SORO LÁCTEO E  
AMIDO**

**RHEOLOGICAL BEHAVIOUR AND EMULSIFYING PROPERTIES OF A  
MIXED SYSTEM CONSISTING OF WHEY PROTEINS AND STARCH**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Alimentos, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADO em 28 de julho de 2022.

Prof. Dr. Jaime Vilela de Resende      UFLA  
Prof. Dr. Sérgio Augusto de Sousa Campos      UNILAVRAS

Prof. Dr. Luiz Ronaldo De Abreu  
Orientador

Prof. Dr. Jaime Vilela De Resende  
Coorientador

Profa. Dra. Joelma Pereira  
Coorientadora

**LAVRAS – MG  
2022**

**AGRADEÇO E DEDICO A DEUS**

Aos meus familiares, a meu querido e amado pai, Roles, por seu amor e apoio.

Aos meus irmãos e irmãs, Rodney, Fedly e Rachelle Suфра

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer ao criador por me conceder saúde, coragem e sabedoria. Por me dar forças e iluminar o caminho nos momentos mais difíceis que passei longe da minha família, por colocar pessoas incríveis no meu caminho, por me ajudar a chegar até aqui. Por me fazer entender que os momentos difíceis são apenas provas a serem superadas e que nunca se deve desistir.

Aos membros da minha família que, apesar da distância, sempre me deram apoio e incentivo. Sempre acreditaram em mim e nos meus sonhos, por me permitirem entender que posso contar com eles, em todas as fases da minha vida, sejam quais forem as circunstâncias. Agradeço-lhes pelas lições que me inculcaram. Sem eles, nada disso teria sido possível. Em especial, à minha irmã Rachelle, aos meus irmãos Rodney e Fedly pelo cuidado e por estarem sempre comigo, no que eu precisasse.

Agradecimentos especiais ao Professor Luiz Ronaldo de Abreu e Jaime Vilela de Resende, pela oportunidade de realizar este trabalho. Obrigado pela orientação, pela confiança que depositaram em mim,

Um agradecimento à professora Joelma Perriera por me ajudar a obter tudo o que era necessário para a realização deste trabalho e por todo o conhecimento que compartilhou comigo e por todas as lições transmitidas.

Sou extremamente grato à Creuza Pedroso Amaral que me acolheu e que me ajudou no que foi possível. Um agradecimento especial aos membros do laboratório de refrigeração do DCA, principalmente à Ana Cristina Freitas Oliveira Meira, pela participação na realização das análises, seus conselhos e sugestões. Muito obrigado, também, à Larrissa Carolina Morais, sua contribuição foi essencial para a realização deste trabalho!

À Universidade Federal de Lavras, aos membros dos diferentes laboratórios do DCA e aos professores, colegas e funcionários, por suas contribuições.

À CAPES, por cobrir minhas despesas durante os dois anos do curso. Aos vários laboratórios que me disponibilizaram os seus equipamentos para a realização deste trabalho. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Aos amigos que fiz, durante este período do curso, com os quais compartilhei momentos de alegria, mas também de stress e frustração.

Um agradecimento aos membros da banca pela avaliação e crítica ao meu trabalho.

Meus sinceros agradecimentos a todos que participaram de alguma forma na realização deste trabalho.

## RESUMO

O soro de leite há muito é considerado resíduo, entretanto é rico em proteínas de alto valor biológico. Além disso, pode, na forma de concentrado, ser misturado ao amido, para melhorar suas propriedades funcionais e, portanto ser utilizado mais eficientemente na indústria alimentícia. Os resultados dessa mistura pode variar dependendo de certas condições específicas do tipo de amido utilizado. O objetivo desta pesquisa foi avaliar o efeito da adição do concentrado proteico de soro de leite a três diferentes tipos de amido (polvilho doce PVD, polvilho azedo - PVA e amido de milho AM) nas características reológicas e propriedades emulsificantes das misturas. A concentração de proteína foi fixada em 2,5% (P/V) e as concentrações de amido foram de 0%, 2,5%, 5,0% e 7,5% (P/V). Para as misturas, foram feitas análises da composição centesimal (teores de umidade, lipídeos, proteínas, carboidratos, cinzas), pH, comportamento reológico e análises das microestruturas por microscopia eletrônica de varredura. As emulsões foram caracterizadas quanto à capacidade emulsificante, estabilidade e a microestrutura por microscopia de fluorescência. A viscosidade aparente das misturas foram influenciadas pelo teor de amido. A proteína, na concentração de 2,5%, não teve efeitos marcantes na viscosidade e no comportamento de fluxo da mistura com exceção do PVD, em que a presença de proteína contribuiu para um aumento significativo. A microestrutura dos géis varia, dependendo do tipo e da concentração do amido, mas também da presença de proteína. O AM forma géis opacos e irregulares, enquanto os géis de PVD e PVA são mais regulares, menos opacos e com mais poros. A presença de proteína contribui para o reforço da estrutura dos géis. A capacidade emulsificante da mistura aumenta com o aumento da concentração de amido, principalmente para AM. A presença de 2,5% de amido na mistura contribui para a obtenção de uma emulsão de maior estabilidade comparando com a solução de proteína pura. Para concentrações de amido de 5% e 7%, a estabilidade da emulsão foi reduzida pela floculação por depleção. Para o aumento da viscosidade, a mistura de WPC com PVD foi a mais indicada; a mistura com PVA, por outro lado, foi mais adequada para a formação de emulsões estáveis. A melhoria das propriedades reológicas e emulsificantes, resultantes da mistura entre amido e concentrado proteico de soro, depende da concentração deste último, do tipo de amido, mas também de outros parâmetros a ter em conta como o pH.

**Palavras-chave:** Gelatinização. Emulsificante. Concentrado de proteína. Proteína de soro de leite. Polvilho azedo. Polvilho doce. Amido de milho. Reologia. Viscosidade.

## ABSTRACT

Whey has long been considered waste. However, it is rich in high-biological value proteins. In addition, in the form of concentrate, it can be mixed with starch to improve its functional properties and, therefore, be used more efficiently in the food industry. Mixing them may vary depending on certain conditions specific to the type of starch used. This research aimed to evaluate the effect of adding whey protein concentrate to three different types of starch (sweet cassava starch - PVD, sour cassava starch - PVA, and corn starch AM) on the rheological characteristics and emulsifying properties of the mixtures. The protein concentration was established at 2.5% (W/V) and the starch concentrations were 0%, 2.5%, 5.0%, and 7.5% (W/V). The centesimal composition (moisture content, lipids, proteins, carbohydrates, ash), pH, and rheological behavior were determined, and the microstructure was analyzed using scanning electron microscopy. The emulsions were characterized for emulsifying capacity, stability, and microstructure by fluorescence microscopy. The starch content influenced the apparent viscosity of the mixtures. The protein in the concentration of 2.5% presented no marked effects on the viscosity and flow behavior of the mixture, apart from PVD, for which the presence of protein contributed to a significant increase. The microstructure of the gels varies depending on the type and concentration of starch and the presence of protein. AM forms opaque and irregular gels, while PVD and PVA gels are more regular, less opaque, and with more pores. The presence of protein contributes to strengthening the structure of the gels. The emulsifying capacity of the mixture increases with increasing starch concentration, especially for AM. The presence of 2.5% starch in the mixture contributes to obtaining an emulsion of greater stability than the pure protein solution. The emulsion stability was reduced due to depletion flocculation for 5% and 7% starch concentrations. The mixture of WPC with PVD was the most indicated for the viscosity increase. On the other hand, the mixture with PVA was more suitable for forming stable emulsions. The improvement of the rheological and emulsifying properties resulting from the mixture of starch and whey protein concentrate depends on the latter's concentration, the type of starch, and other parameters to be considered, such as pH.

**Keywords:** Gelatinization. Emulsifier. Protein concentrate. Whey protein. Sour cassava starch. Sweet cassava starch. Corn starch. Rheology. Viscosity.

## LISTA DAS TABELAS

Tabela 1 - Composição típica (g / l) de soro de leite doce e ácido .....	20
Tabela 2 - Componentes típicos de vários produtos proteicos derivados de soro de leite .....	21
Tabela 3 - Resultado das análises de composição centesimal .....	42
Tabela 4 - Resultados das medidas dopH dos produtos .....	42
Tabela 5 - Resultados dos parâmetros reológicos dos géis .....	45
Tabela 6 - Resultados das análises de estabilidade e da capacidade Emulsificante .....	49

## LISTA DAS FIGURAS

Figura 1 - Comparação da análise centesimal de leite e do soro de leite .....	18
Figura 2 - Esquema do processo de produção de concentrado de proteína de soro de leite (WFC).....	20
Figura 3 - Relação entre a viscosidade aparente e a concentração de proteína, WPC: concentrado de proteína de soro, MPWPC: Proteína de soro de leite microparticulada, PDWPC- (A, B, C, D): Proteína de soro de leite parcialmente desnaturada .....	23
Figura 4 - Representação da estrutura lamelar de um grânulo de amido (A) Pilhas de lamelas microcristalinas separadas por anéis de crescimento amorfos. (B) Visão ampliada das regiões amorfas e cristalinas. (C) Estruturas helicoidais duplas formadas por cadeias adjacentes de amilopectina dão origem a lamelas cristalinas .....	26
Figura 5 - Representação da estrutura linear da amilose (a) e ramificada da amilopectina (b).....	27
Figura 6 - Estrutura da amilose e amilopectina.....	28
Figura 7 - Gráfico das análises de viscosidade e de tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação: AM10: 5% Amido de milho; AMP55: 2,5% amido de milho / 2,5% proteína; AMP105: 5% amido de milho / 2,5% proteína; AMP155: 7,5% amido de milho / 2,5% proteína; PVA10: 5% Polvilho azedo; PVAP55: 2,5% polvilho azedo / 2,5% proteína; PVAP105: 5% polvilho azedo / 2,5% proteína; PVAP155: 7,5% polvilho azedo / 2,5% proteína; PVD10: 5% Polvilho doce; PVDP55: 2,5% polvilho doce / 2,5% proteína; PVDP105: 5% polvilho doce / 2,5% proteína; PVDP155: 7,5% polvilho doce / 2,5% proteína .....	43
Figura 8 - Fotomicrografias dos géis por MEV; a) 2,5% Proteína (P5); b) 5% Amido de milho (AM10); c) 5% Polvilho doce (PVD10); d) 5% Polvilho azedo (PVA10); e) 2,5% amido de milho / 2,5% proteína (AMP55); f) 2,5% polvilho doce / 2,5% proteína (PVDP55); g) 2,5% polvilho azedo / 2,5% proteína (PVAP55); h) 5% amido de milho / 2,5% proteína (AMP105); i) 5% polvilho doce / 2,5% proteína (PVDP105); j) 5% polvilho azedo / 2,5% proteína (PVAP105); k) 7,5% amido de milho / 2,5% proteína (AMP155); l) 7,5%	

polvilho doce / 2,5% proteína (PVDP155); m) 7,5% polvilho azedo / 2,5%  
proteína (PVAP155) .....47

Figura 9 - Fotomicrografias das emulsões por microscopia epifluorescencia; (A) 2,5%  
amido de milho / 2,5% proteína (AMP55);(B) 2,5% polvilho azedo / 2,5%  
proteína (PVAP55);(C) 2,5% polvilho doce / 2,5% proteína (PVDP55);(D)  
5% amido de milho / 2,5% proteína (AMP105);(E) 5% polvilho azedo / 2,5%  
proteína (PVAP105); (F) 5% polvilho doce / 2,5% proteína (PVDP105);(G)  
7,5% amido de milho / 2,5% proteína (AMP155); (H) 7,5% polvilho azedo /  
2,5% proteína (PVAP155); (J) 7,5% polvilho doce / 2,5% proteína  
(PVDP155); (J)2,5% Proteína (P5); (1) Fluorocromo red Nile; (2)  
Fluorocromo rodhamine B. P. A. ....52

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AM	Amido de milho
AOAC	Association of Official Agricultural Chemists
BSA	Albumina sérica bovina
CE	Capacidade emulsificante
CTA	3-cloro-2- cloreto de hidroxipropiltrimetilamônio
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DCA	Departamento de Ciência de Alimentos
DP	Grau de polimerização (degre of polymerization)
ES	Estabilidade da emulsão
ETMAC	Cloreto de 2,3-epoxipropiltrimetilamônio
GMP	Glicomacropéptídeo
HSD	Honestly Significant Difference
Ig	Imunoglobulinas
Lf	Lactoferrina bovina
LP	Lactoperoxidase
PP	Proteose-peptona
PVA	Polvilho azedo
PVD	Polvilho doce
SAS	Statistical Analysis Software
UFLA	Universidade Federal de Lavras
WPC	Whey Protein Concentrate
WPI	Whey Protein Izolated
$\alpha$ -LA	$\alpha$ -lactalbumina
$\beta$ -LG	$\beta$ -lactoglobulina

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>15</b>
1.1	Objetivos.....	17
1.1.1	Objetivo geral.....	17
1.1.2	Objetivos específicos.....	17
1.2	Hipótese.....	17
<b>2</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA.....</b>	<b>18</b>
2.1	Generalidades sobre o soro de leite.....	18
2.2	Tipo de soro.....	18
2.3	Composição do soro de leite.....	19
2.4	Concentrado Proteico de Soro (WPC).....	20
2.5	Propriedades do soro de leite.....	21
2.5.1	Propriedades da lactose.....	21
2.5.2	Propriedades nutricionais e funcionais das proteínas.....	22
2.6	Generalidades sobre o amido.....	25
2.7	Composição do amido.....	25
2.7.1	Estrutura física.....	25
2.7.2	Estrutura química.....	26
2.8	Propriedades funcionais.....	28
2.8.1	Gelatinização.....	28
2.8.2	Poder de expansão e solubilidade.....	29
2.8.3	Retrogradação.....	29
2.9	Modificação dos amidos.....	30
2.10	Interação com outros constituintes alimentares.....	32
2.10.1	Interação com outros carboidratos.....	32
2.10.2	Interação com lipídios.....	32
2.10.3	Interação com proteínas.....	33
2.11	Fécula de mandioca.....	34
2.11.1	Polvilho doce e azedo.....	34
2.12	Amido de milho.....	35
<b>3</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>37</b>
3.1	Material.....	37
3.2	Análises físico-químicas.....	37
3.2.1	Análise da composição centesimal.....	37
3.2.2	Determinação do pH.....	38
3.2.3	Preparação dos géis.....	38
3.2.4	Caracterização dos géis.....	39
3.2.4.1	Análise do comportamento reológico.....	39
3.2.4.2	Análise por microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	39
3.2.5	Preparação de emulsões.....	40
3.2.6	Caracterização das emulsões.....	40
3.2.6.1	Capacidade emulsificante e estabilidade das emulsões.....	40
3.2.6.2	Microscopia de fluorescência.....	40
3.3	Análise estatística.....	41
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>42</b>
4.1	Composição centesimal.....	42
4.2	pH dos produtos.....	42

<b>4.3</b>	<b>Viscosidade e comportamento do fluxo .....</b>	<b>42</b>
<b>4.4</b>	<b>Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) .....</b>	<b>46</b>
<b>4.5</b>	<b>Capacidade emulsificante e estabilidade .....</b>	<b>49</b>
<b>4.6</b>	<b>Microscopia epifluorescencia.....</b>	<b>51</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>57</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>59</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Na indústria de alimentos, em geral, ocorre, quase sempre, a geração de subprodutos, sendo que a indústria de laticínios não foge a essa regra. No caso particular do processo de fabricação da maioria dos queijos, há a geração de um subproduto conhecido como soro de leite que é um líquido de cor amarelada e opaca, no qual se dispersa uma boa proporção dos constituintes sólidos solúveis do leite. Manso e López-Fandiño (2004) e Masotti *et al.* (2017) relatam que, para cada 100 litros de leite usados para fazer queijos, 70 a 90 litros de soro de leite são gerados como subproduto.

Esse produto, o soro de leite, foi, por muito tempo, considerado um desperdício e o seu aproveitamento, era em pequena parte, destinado à alimentação animal e o restante era descartado na natureza. O soro é considerado extremamente tóxico ao meio ambiente por ter uma demanda bioquímica de oxigênio (DBO) muito elevada, estimada por Andrade e Martins (2002), Papademas e Kotsaki (2020) e Sarah e Amel (2017) em 50.000 mg de O<sub>2</sub>/L. Porém, considerando a composição do soro em proteínas, lactose e outros constituintes, ele sempre apresentou bom potencial para a fabricação de vários produtos muito interessantes em termos de valor nutricional (MASOTTI *et al.*, 2017). Por volta da década de 1970, estudos foram realizados, com o objetivo de reduzir o seu descarte na natureza, optando por um possível aproveitamento (PAPADEMAS; KOTSAKI, 2020). Atualmente, com o avanço da tecnologia e das pesquisas realizadas, na valorização do soro de leite e principalmente por pressão das leis ambientais, o soro não pode mais ser descartado na natureza. Entre essas tecnologias, está a ultrafiltração que permite a obtenção de concentrado de proteína e de permeado de soro de leite.

Apesar das diferentes aplicações do soro de leite, Yadav *et al.* (2015) relatam que apenas 50% do soro total produzido no mundo é processado e transformado em diferentes produtos alimentícios. Os autores relatam ainda que, desse soro processado, em média, 45% são usados diretamente na forma líquida, 30% na forma de soro em pó, 15% na forma de lactose e diversos subprodutos e o restante na forma de concentrados proteicos de soro de leite. O concentrado proteico obtido por ultrafiltração é utilizado de diferentes formas na alimentação, mas apresenta algumas limitações pela sensibilidade das proteínas principalmente pelo calor. Para melhorar a estabilidade térmica dessas proteínas e garantir a expressão das suas propriedades funcionais nos alimentos, Wagoner e Foegeding (2017) afirmam que uma das soluções apropriadas consiste em complexá-las com outros compostos, como os polissacarídeos. Assim, foi relatado, em um estudo de Ren e Wang (2019), que géis complexados de isolado proteico de soro (WPI) com outros compostos exibiram propriedades

mecânicas e módulos de armazenamento com valores superiores em comparação com WPI isoladamente. Além disso, um estudo realizado por Wagoner e Foegeding (2017) reportou que as proteínas do soro do leite são sensíveis às altas temperaturas e a certo pH, o que diminui suas estabilizações eletrostáticas. Esse estudo também mostrou que as proteínas de soro de leite, misturadas com pectina, podem ser usadas para obter um complexo mais termicamente estável com propriedades funcionais melhoradas e adequadas para uso na fabricação de bebidas lácteas.

Um dos polissacarídeos conhecidos e amplamente utilizados na fabricação de alimentos que contribuem para a melhoria das propriedades reológicas é o amido (CHINMA; ARIAHU; ABU, 2013). Este último é encontrado em quantidade e qualidades, em várias plantas, como a mandioca (TAPPIBAN *et al.*, 2020a, 2020b) bem como ao nível do milho. Os grânulos de amido, hidratados e aquecidos a uma temperatura suficiente, gelatinizam-se, formando um composto viscoso; há um aumento em suas solubilidades e uma melhora nas propriedades mecânicas e reológicas (BAKS *et al.*, 2007). Também o amido usado, em estado nativo, tem certas limitações em termos de suas propriedades funcionais. Assim, para melhorar suas propriedades, são utilizadas modificações químicas e também outros métodos que consistem em complexá-los com outros compostos. No entanto o amido reage de forma diferente, dependendo do tipo de composto em questão e dos tratamentos aplicados. Da mesma forma, existem variações entre amidos de diferentes origens e os diferentes comportamentos que eles apresentam em solução (HARTATI; AJIE; HARTATI, 2020; TAPPIBAN *et al.*, 2020a).

Diante do que foi exposto, este estudo propõe avaliar os efeitos da proteína de soro, misturado com amido (polvilho doce, polvilho azedo e amido de milho), em relação às propriedades reológicas e emulsificantes em condições específicas de temperatura e pH.

## **1.1 OBJETIVOS**

### **1.1.1 Objetivo geral**

Estudar o comportamento da mistura resultante da interação entre as proteínas do soro do leite e a fécula de mandioca ou o amido de milho quanto às suas propriedades reológicas e gelificantes.

### **1.1.2 Objetivos específicos**

- a) avaliar o efeito da adição do concentrado de proteínas de soro sobre o comportamento reológico do complexo formado pelas misturas;
- b) avaliar o efeito da adição de amido de milho ou de mandioca em diferentes concentrações sobre as propriedades emulsificantes do concentrado de proteína de soro;
- c) conhecer as propriedades microestruturais dos complexos por microscopia eletrônica de varredura;
- d) ganhar conhecimento sobre as propriedades microestruturais das emulsões formadas pelos complexos por microscopia de epifluorescência;
- e) propor mecanismos de interação entre soro de leite e amido que justifiquem os resultados obtidos.

## **1.2 Hipótese**

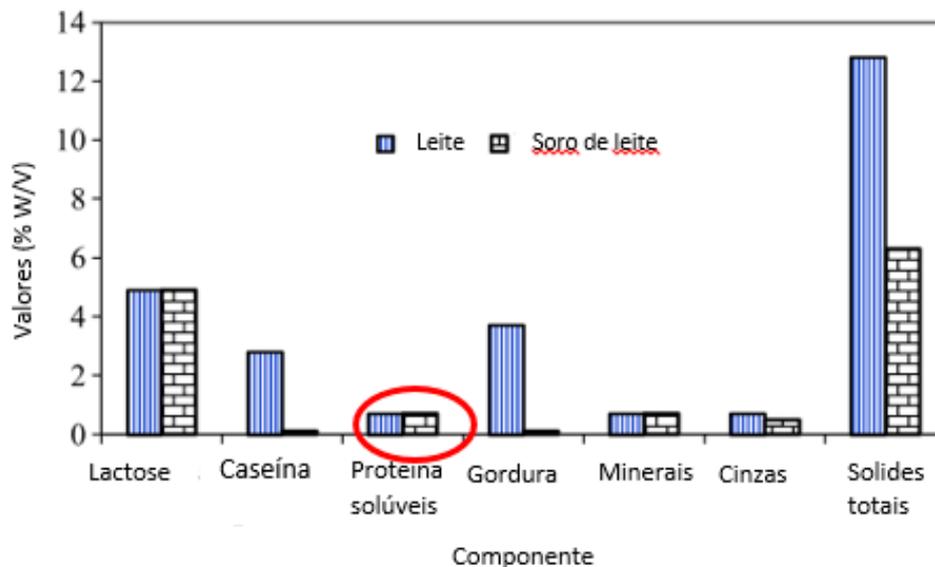
- a) Suspensões constituídas de amido de mandioca ou de milho e de concentrado proteico de soro podem formar complexos com melhores propriedades reológicas, mantendo as proteínas estáveis, preservando as suas propriedades.
- b) Géis formados com amido de mandioca ou de milho e de concentrado proteico de soro podem formar emulsões com melhores propriedades, quando comparadas com emulsões proteicas puras.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1 Generalidades sobre o soro de leite

O soro de leite é um subproduto da fabricação de queijo, exceção feita ao queijo ricota no qual o soro é a matéria prima. Em geral, é definido como a parte do líquido residual do leite que permanece após a coagulação e a separação da coalhada (Figura 1) (MASOTTI *et al.*, 2017; PAPADEMAS; KOTSAKI, 2020). Na verdade, o soro representa aproximadamente entre 70 a 90% do volume do leite e retém aproximadamente 50% do extrato seco do leite (MASOTTI *et al.*, 2017).

Figura 1 - Comparação da análise centesimal de leite e do soro de leite



Fonte: Yadav *et al.* (2015).

### 2.2 Tipo de soro

O tipo e a composição do soro de leite dependem, principalmente, da coagulação das caseínas no leite. Os dois tipos de soro são soro de leite doce e soro de leite azedo (Tabela 1).

O soro de leite doce é obtido da fabricação de queijos prensados, cozidos ou não (PAPADEMAS; KOTSAKI, 2020). É o tipo de soro mais conhecido proveniente do fabrico de queijos cuja transformação se baseia na coagulação enzimática da caseína por coalho ou outras enzimas, isso sem pré-acidificação. Esse fato resulta em um soro de leite doce com um pH em torno de 6,5 (CHATZIPASCHALI; STAMATIS, 2012; PAPADEMAS & KOTSAKI, 2020).

O soro de leite doce é rico em lactose e proteínas, com baixo teor de sais minerais. Entre as proteínas, estão as proteínas solúveis e também as glicoproteínas provenientes da parte solúvel da k-caseína obtida por sua hidrólise (HUMA *et al.*, 2015).

O soro ácido trata-se do soro de leite da fabricação de queijo fresco e queijo de pasta mole. Esse tipo de soro é obtido pela ação de ácidos orgânicos ou quimosina, levando o pH a um nível inferior a 5 (PAPADEMAS; KOTSAKI, 2020), a fim de precipitar as micelas de caseína (CHATZIPASCHALI; STAMATIS, 2012). Bactérias lácticas que sintetizam ácido láctico, por exemplo, podem ser adicionadas ao leite para coagular e obter soro de leite ácido. Este tipo de soro de leite é menos rico em lactose e mais rico em minerais (Tabela 1) (HUMA *et al.*, 2015).

### 2.3 Composição do soro de leite

A lactose é o principal componente de ambos os tipos de soro de leite, sendo responsável por aproximadamente 63-73% do total de sólidos (PAPADEMAS; KOTSAKI, 2020). Está presente, em maior proporção, no soro doce, o que pode ser explicado pela transformação de parte deste em ácido láctico.

Em seguida, as proteínas são os componentes majoritários que constituem o soro e são principalmente proteínas solúveis, sobretudo,  $\beta$ -lactoglobulina ( $\beta$ -LG, 65%),  $\alpha$ -lactalbumina ( $\alpha$ -LA, 25%), albumina séricabovina (BSA, 8%), imunoglobulinas (Ig), proteose-peptona (PP), lactoperoxidase (LP), lactoferrina bovina (Lf) e o glicomacropéptido (GMP) (PAPADEMAS; KOTSAKI, 2020; WANG, 2015; YADAV *et al.*, 2015). O glicomacropéptido, que é uma proteína derivada da caseína, que se forma, durante a primeira etapa enzimática da fabricação do queijo, também é encontrado no soro de leite. A constituição, em termos de proporção de GMP e outras proteínas do soro, depende da origem do leite (PAPADEMAS; KOTSAKI, 2020).

O soro de leite também é constituído de elementos minerais. Encontramos, no soro de leite, cloretos de sódio e potássio, em uma proporção de 50% dos minerais totais e, também, sais de cálcio, encontrados principalmente na forma de fosfato de cálcio (CHATZIPASCHALI; STAMATIS, 2012).

As vitaminas solúveis em água, como a riboflavina (B2), ácido pantotênico (B5), tiamina (B1), piridoxina (B6) e ácido ascórbico, são encontradas em grandes quantidades e dão ao soro de leite uma cor amarelo-esverdeado (HUMA *et al.*, 2015; PAPADEMAS; KOTSAKI, 2020).

Tabela 1 - Composição típica (g / l) de soro de leite doce e ácido

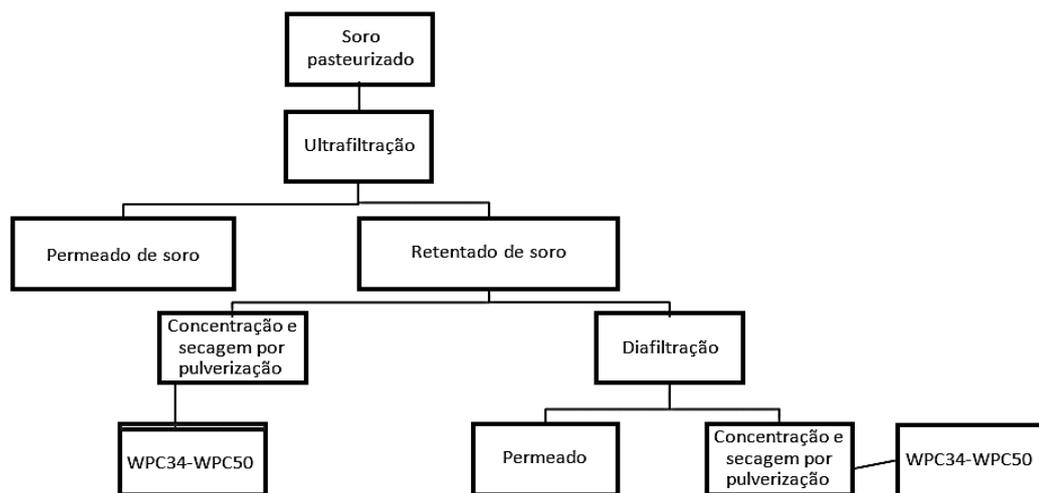
Constituintes	Soro doce (g/L)	Soro azedo (g/L)
Sólidos totais	63,0-70,0	63,0-70,0
Lactose	46,0-52,0	44,0-46,0
Proteína	6,0-10,0	6,0-8,0
Gordura	5,0	0,4
Lactato	2,0	6,4
Cinza	5,0-5,2	7,5- 8,0
Cálcio	0,4-0,6	1,2-1,6
Fosfato	1,0-3,0	2,0-4,5
Cloreto	1,1	1,1

Fonte: Papademas e Kotsaki (2020) e Yadav *et al.* (2015).

## 2.4 Concentrado Proteico de Soro (WPC)

O concentrado proteico do soro é obtido pelo processo de ultrafiltração/diafiltração, concentração por evaporação sob pressão reduzida e secagem por pulverização do soro pasteurizado (Figura 2). Esses processos permitem a eliminação da maioria dos constituintes não proteicos de forma a obter uma proporção de proteína entre 34 a 80 %, um teor de lipídeos entre 1e 10%, cinzas entre 2 e 15% e lactose não superior a 60% (ABD EL-SALAM; EL-SHIBINY; SALEM, 2009; JOVANOVIC; BARAC, 2005; YADAV *et al.*, 2015).

Figura 2 - Esquema do processo de produção de concentrado de proteína de soro de leite (WPC)



Fonte: Yadav *et al.* (2015).

Dependendo do teor de proteína, existem várias categorias de produtos WPC. Normalmente disponíveis estão WPC34, WPC50, WPC60, WPC75 e WPC80. O valor

numérico para expressar a porcentagem de proteína, por exemplo, WPC34, deve conter pelo menos 34% de proteína (YADAV *et al.*, 2015). De acordo com United States (2013), o conteúdo de proteína, nos produtos WPC, não deve ser inferior a 25%. Os demais componentes, como a gordura, devem estar entre 1 e 10% e a umidade entre 2 e 6%, o valor de cinzas entre 2 e 15% e o teor de lactose não deve ser superior a 60%.

Tabela 2 - Componentes típicos de vários produtos proteicos derivados de soro de leite

<b>Produtos</b>	<b>Proteína (%)</b>	<b>Lactose (%)</b>	<b>Gordura (%)</b>	<b>Cinza (%)</b>	<b>Humidade (%)</b>
<b>WPC34</b>	34,0-36,0	48,0-52,0	3,0-4,5	6,5-8,0	3,0-4,5
<b>WPC50</b>	50,0-52,0	33,0-37,0	5,0-6,0	4,5-5,5	3,5-4,5
<b>WPC60</b>	60,0-62,0	25,0-30,0	1,0-7,0	4,0-6,0	3,0-5,0
<b>WPC75</b>	75,0-78,0	10,0-15,0	4,0-9,0	4,0-6,0	3,0-5,0
<b>WPC80</b>	80,0-82,0	4,0-8,0	4,0-8,0	3,0-4,0	3,5-4,5
<b>WPI</b>	90,0-92,0	0,5-1,0	0,5-1,0	2,0-3,0	4,5

Fonte: Yadav *et al.* (2015).

## 2.5 Propriedades do soro de leite

Apesar de ser fonte de minerais e vitaminas, a maior parte das propriedades funcionais e nutricionais do soro de leite são proporcionadas pela presença de lactose e proteína em quantidades adequadas.

### 2.5.1 Propriedades da lactose

Do ponto de vista alimentar, a lactose é a fonte principal de carboidratos no soro de leite, representando 90% do total de carboidratos (PAPADEMAS; KOTSAKI, 2020). Sendo um dissacarídeo é, portanto uma fonte de glicose e galactose. Durante a fermentação, a lactose é um substrato muito bom, para fermentos lácticos, porque este último possui uma enzima, a  $\beta$ -galactosidase, que permite a hidrólise da lactose em glicose e galactose. A glicose e a galactose são posteriormente transformados em ácido láctico (MARTINS; VEIGA-SANTOS; CASTILHO, 2014; YADAV *et al.*, 2015). Por tratamento térmico de soro de leite, lactose é convertida em lactulose que é um componente que promove o crescimento de Bifidobactérias. Também facilita a absorção pelo intestino de diferentes elementos como cálcio, magnésio e

fósforo. Como açúcar redutor, a lactose é uma molécula favorável à realização de reações de caramelização e reações de Maillard, caso em que o soro seria utilizado em certas preparações (PAPADEMAS; KOTSAKI, 2020). A lactose constitui um portador de aroma, por isso, é utilizada na forma purificada e cristalizada em muitos produtos de panificação, confeitaria, bebidas, etc (PAPADEMAS; KOTSAKI, 2020; RYAN; WALSH, 2016).

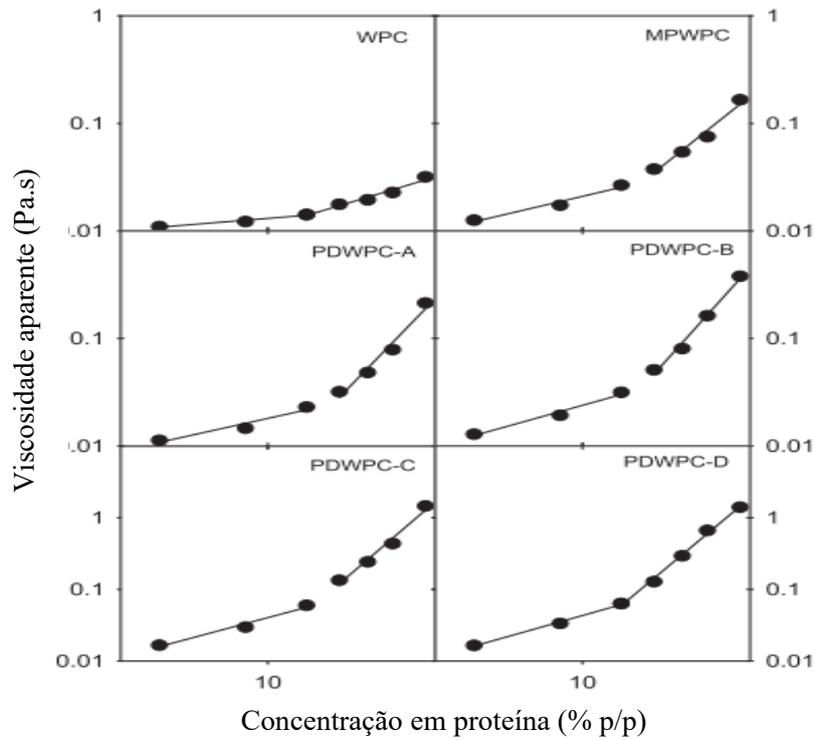
### **2.5.2 Propriedades nutricionais e funcionais das proteínas**

Do ponto de vista nutricional, as proteínas do soro constituem compostos de grande importância pelo fato de que elas são ricas em aminoácidos essenciais, como lisina, aminoácidos de enxofre e triptofanos (DULLIUS; GOETTERT; SOUZA, 2018). Também é mencionado, em alguns estudos, que o soro de leite contém uma abundância de leucina, que é um aminoácido que desempenha um papel fundamental, no metabolismo de síntese das proteínas, promovendo a fosforilação (HA; ZEMEL, 2003; HARAGUCHI; ABREU; PAULA, 2014). De acordo com Ha e Zemel (2003), os glicomacropéptídeos do soro são proteínas que exibem atividade prebiótica e/ou probiótica e podem estimular as células intestinais, melhorando assim a saúde gastrointestinal. Do ponto de vista funcional, as proteínas do soro do leite têm propriedades muito interessantes, sendo as principais propriedades de emulsificação, formação de espuma e gelificação (SETIOWATI; WIJAYA; MEEREN, 2020).

#### **a) Propriedades reológicas**

As propriedades reológicas das proteínas em solução resultam da interação de proteínas entre moléculas de água, mais particularmente em virtude das interações entre agregados de proteínas em solução (ZHANG *et al.*, 2016). Os mesmos autores relatam que com o mesmo nível de concentração de proteína, o nível de viscosidade varia, dependendo da sua estrutura (Figura 4), por exemplo, as partículas compactas têm uma viscosidade menor que as partículas fibrilares abertas. Assim, num estudo realizado por Hudson, Daubert e Foegeding (2000), foi observado o aumento da viscosidade das proteínas com o aumento da temperatura. Isso pode ser explicado pelo fato de que a alta temperatura contribui, para a desnaturação parcial das proteínas nativas, causando mais desdobramentos e interação entre elas. Essa é a causa do aumento da viscosidade ao aumentar o raio hidrodinâmico das proteínas.

Figura 3 - Relação entre a viscosidade aparente e a concentração de proteína, WPC: concentrado de proteína de soro, MPWPC: Proteína de soro de leite microparticulada, PDWPC- (A, B, C, D): Proteína de soro de leite parcialmente desnaturada



Fonte: Zhang *et al.* (2016).

#### b) Propriedades de gelificação

As proteínas, em um nível de temperatura e pH próximo ao seu potencial isoelétrico, tendem a perder suas estruturas originais e se agrupar. Essa aglomeração que é o processo de gelificação das proteínas é explicada pela formação de interações hidrofóbicas pela diminuição das forças repulsivas eletrostáticas que existiam entre elas (BRAVO-NÚÑEZ; GARZ; ROSELL, 2019). As características e aparência do gel formado dependerão dos tratamentos térmicos aplicados e do pH. Em altas temperaturas, tendem a desnaturar, em pH próximo ao potencial isoelétrico e as proteínas perdem suas cargas de repulsão eletrostática e se tornam menos solúveis. Essa modificação da solubilidade pode afetar várias propriedades das proteínas, como as propriedades de gelificação (CASTRO *et al.*, 2017; PELEGRINE; GASPARETTO, 2005). Essas propriedades características das proteínas do soro são exploradas na fabricação de vários produtos, como bebidas à base de leite, mas são limitadas pelos parâmetros de pH e temperatura dos produtos. Assim, são acoplados a certos elementos, para formar complexos que garantem a estabilidade e expressão das propriedades desejadas,

polissacarídeos, como a pectina e o amido de diferentes origens (batata, mandioca, milho) que são compostos valiosos para essa operação.

c) Propriedades emulsificantes

A propriedade emulsificante das proteínas é definida como a capacidade de formar filmes espessos e flexíveis entre as interfaces óleo-água, permitindo a estabilização das duas estruturas imiscíveis. Essa capacidade se deve ao caráter anfifílico deste último, ou seja, elas têm, no nível de suas constituições, ambos, regiões hidrofóbicas (entra em contato com o óleo) e hidrofílicas (entra em contato com a água) (CASTRO *et al.*, 2017). As proteínas do soro do leite apresentam um nível de solubilidade que permite que se difundam rapidamente entre as interfaces óleo / água (SETIOWATI; WIJAYA; MEEREN, 2020) o que aumenta o poder de emulsificante. Esse poder é afetado por várias condições de processamento, como a desnaturação pelo calor, que induz à sua perda da solubilidade. Podemos classificar a proteína de soro de leite, em ordem de estabilidade térmica, da seguinte forma;  $\alpha$ -LA >  $\beta$ -LG > BSA > Igs (CASTRO *et al.*, 2017). A capacidade de emulsificação é expressa numericamente pela quantidade de óleos que podem se ligar à porção hidrofóbica da molécula de proteína para garantir a estabilidade entre as duas fases do sistema. Quanto mais óleo a proteína pode absorver, maior sua capacidade de emulsificação (CASTRO *et al.*, 2017; FIREBAUGH; DAUBERT, 2005). As propriedades de emulsificação das proteínas variam dependendo de fatores como concentração de proteína, pH, força iônica, concentração de cálcio e lactose, processamento e condições de armazenamento às quais foi exposta (JOVANOVIC; BARAC, 2005).

d) Propriedades de formação de espuma

As proteínas do soro também têm a capacidade de formar uma espuma estável, incorporando ar. A capacidade de formação de espuma das proteínas pode ser explicada pelo fato de possuírem certa flexibilidade (CASTRO *et al.*, 2017). Essas propriedades também envolvem seus caracteres anfifílicos, o que lhes dá a capacidade de se desdobrar e se fixar entre duas fases dispersas (WANG, 2015).

De acordo com Jovanovic e Barac (2005) e Wang (2015), as proteínas não desnaturadas têm melhores propriedades de formação de espuma que as proteínas desnaturadas. Em um nível de desnaturação parcial por tratamento térmico moderado, as proteínas ainda mantêm seu poder de agitação, expondo seus grupos hidrofílicos e hidrofóbicos e permitindo a absorção entre as duas interfaces. No entanto o aquecimento excessivo origina aglomeração, causando a redução dessas propriedades. As propriedades de formação de espuma das proteínas do soro de leite

dependem de fatores, como grau de desnaturação, concentração de íons de  $\text{Ca}^{2+}$ , temperatura, pH, teor de lipídios que afetam diretamente sua estrutura proteica e propriedades interfaciais (WANG, 2015). Por exemplo, a presença de gordura limita a formação de uma boa espuma (ABD EL-SALAM; EL-SHIBINY; SALEM, 2009).

## **2.6 Generalidades sobre o amido**

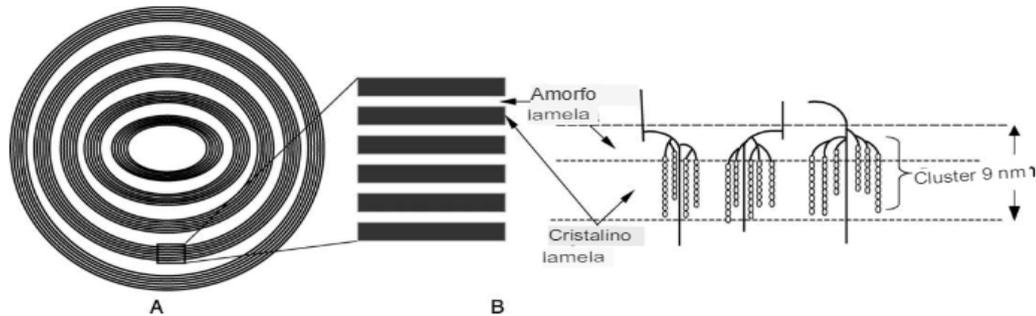
O amido é um polissacarídeo, encontrado em muitas plantas superiores, que se acumula nos tecidos dessas plantas. É encontrado em maior ou menor proporção em cereais (30 a 70%), raízes como mandioca (60 a 90%) e leguminosas (25 a 50%). O amido apresenta-se na forma de grãos, macroscopicamente assimilados a um pó branco insolúvel em água fria, cujo diâmetro dos grãos pode variar, dependendo da sua origem (WATERSCHOOT *et al.*, 2015; WHISTLER; BYRD; THORNBURG, 1955).

## **2.7 Composição do amido**

### **2.7.1 Estrutura física**

A estrutura física dos grãos de amido é representada por camadas de anéis concêntricos (Figura 4), dispostos alternadamente em uma camada clara e uma camada escura, formando estrias. Esses anéis circundam um centro mais escuro chamado “hilo”. As estrias representam a alternância entre zonas amorfas que são zonas com pouca resistência à hidrólise e uma zona que consiste em uma alternância entre lamelas cristalinas e amorfas formando uma zona semicristalina (GARCIA *et al.*, 2016; GOMAND *et al.*, 2010). As lamelas cristalinas são constituídas por moléculas de amilopectina organizadas em cadeias (“Short”: S). As lamelas amorfas, por sua vez, são formadas pelos pontos de junção nas moléculas de amilopectina ou amilose (GARCIA *et al.*, 2016).

Figura 4 - Representação da estrutura lamelar de um grânulo de amido (A) Pilhas de lamelas microcristalinas separadas por anéis de crescimento amorfos. (B) Visão ampliada das regiões amorfas e cristalinas. (C) Estruturas helicoidais duplas formadas por cadeias adjacentes de amilopectina dão origem a lamelas cristalinas



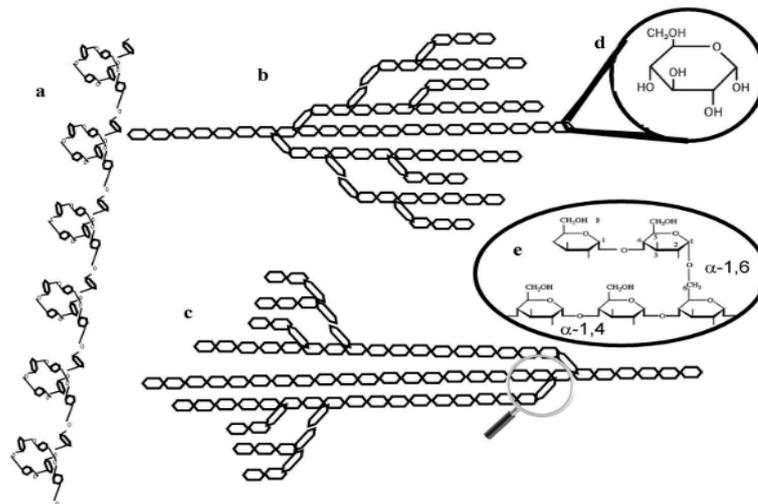
Fonte: Tester, Karkalas e Qi (2004).

### 2.7.2 Estrutura química

Do ponto de vista químico, o amido consiste em uma fração de carboidratos que representa aproximadamente 98-99% da molécula e uma fração de não carboidratos inferior a 1% (CARVALHO; ONWULATA; TOMASULA, 2007).

A fração de carboidratos consiste em unidades monoméricas de D-glicose, ligadas principalmente,  $\alpha$ : (1; 4) e em menor grau  $\alpha$ : (1; 6) (ZHU, 2015). Seguem-se, dependendo do arranjo e da proporção desses dois tipos de ligação entre as moléculas de D-glicose, dois polímeros diferentes que são; amilose que ocorre na forma linear (Figura 5) e amilopectina ocorre na forma ramificada (Figura 5) (HARTATI; AJIE; HARTATI, 2020). A proporção de amilose e amilopectina depende da origem botânica, a fécula de mandioca contém 19% de amilose; amido de arroz contém 27% (CARVALHO; ONWULATA; TOMASULA, 2007).

Figura 5 - Representação da estrutura linear da amilose (a) e ramificada da amilopectina (b)

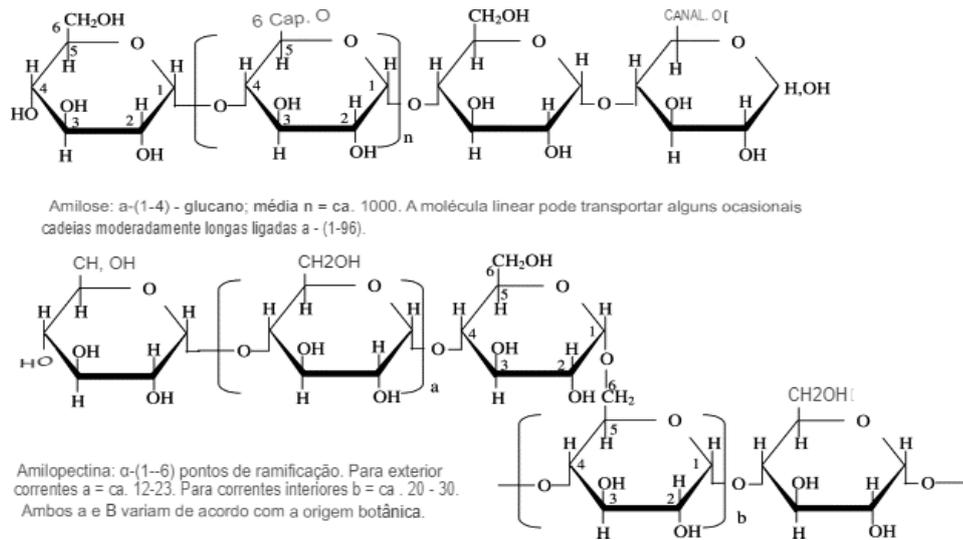


Fonte: Cornejo-Ramírez *et al.* (2018).

A amilose, um dos polímeros que compõem o amido, é composto exclusivamente por moléculas de D-glicose unidas por ligações  $\alpha$ : (1; 4) (FIGURA 6) (GARCIA *et al.*, 2016). A massa molecular média da amilose na batata é de  $1.03 \times 10^6 \text{ g.mol}^{-1}$  e, na mandioca, de  $1.08 \times 10^6 \text{ g.mol}^{-1}$  (GOMAND *et al.*, 2010). Em seu estado nativo, contém, em média, 500 a 6.000 unidades de glicosil (NIELSEN, 1969). A molécula de amilose consiste em uma cadeia linear, possuindo uma conformação helicoidal com grupos hidrofílicos (OH), direcionados para fora e grupos hidrofóbicos (H, CH<sub>2</sub>OH) direcionados para dentro. Essa conformação permite complexar moléculas hidrofóbicas, como iodo, ácidos graxos, surfactantes e determinados tipos de álcool (YOO, 2001).

A amilopectina é um polímero de cadeia ramificada, em que as unidades de D-glicose que a formam são unidas principalmente por ligações  $\alpha$ : (1; 4), mas contém algumas ligações  $\alpha$ : (1; 6) (FIGURA 6) (GARCIA *et al.*, 2016). É o principal carboidrato constituinte do amido cuja massa molecular média é de  $1,7 \times 10^8 \text{ g.mol}^{-1}$ , no amido da batata e de  $0,7 \times 10^8 \text{ g.mol}^{-1}$ , no amido da mandioca, isso dependendo da variedade (GOMAND *et al.*, 2010). A molécula de amilopectina apresenta uma estrutura com cadeias com grau de polimerização (DP) variável as quais podem ser curtas (S, curta) ou cadeias longas (L, longas) (PARKER; RING, 2001). A variação estrutural, ao nível das moléculas de amilopectina, é expressa pela razão cadeia L/cadeia S e depende da origem botânica (TESTER; KARKALAS; QI, 2004).

Figura 6 - Estrutura da amilose e amilopectina



Fonte: Tester, Karkalas e Qi (2004).

A fração não carboidratada do amido purificado é composta por moléculas de proteínas, gorduras e minerais. A proporção desses elementos menores no amido também depende da origem botânica do amido e também da sua base tecnológica. No caso da mandioca, essa fração constitui um percentual de 0,2% (WATERSCHOOT *et al.*, 2015).

## 2.8 Propriedades funcionais

Os grânulos de amido têm propriedades interessantes que são exploradas na indústria na fabricação de muitos produtos. Essas propriedades características do amido são geralmente relacionadas à temperatura em que são processados e também à disponibilidade de água no meio. As principais propriedades funcionais do amido são gelatinização, retrogradação e solubilidade.

### 2.8.1 Gelatinização

O aquecimento dos grãos de amido em meio aquoso faz com que o amido inche, o que se deve a uma absorção irreversível de água nas áreas amorfas. O inchaço faz com que as ligações de hidrogênio se quebrem nas áreas cristalinas e, então, constituintes como a amilose e outros compostos que têm baixo peso molecular se difundem do grão para a solução (CORNEJO-RAMÍREZ *et al.*, 2018; XIE *et al.*, 2006).

A temperatura de gelatinização dos grãos de amido varia dependendo da sua origem (XIE *et al.*, 2006). Isso se deve à variação do tamanho dos grânulos de amido de diferentes origens botânicas. De acordo com Cornejo-Ramírez *et al.* (2018), grânulos de amido maiores requerem um tempo maior para gelificar e atingem temperaturas de gelatinização mais altas que os menores. A temperatura de gelatinização depende também do teor de amilose, visto que, em amidos com alto teor de amilose, são necessárias temperaturas e uma quantidade de energia mais elevada, para permitir a ruptura da dupla hélice da amilose que resulta em uma temperatura de alta gelatinização.

### **2.8.2 Poder de expansão e solubilidade**

A solubilidade ou mesmo o poder de dilatação ou de expansão do amido depende da sua capacidade de reter água, após a gelatinização, pela formação de ligações de hidrogênio entre as moléculas (HARTATI; AJIE; HARTATI, 2020). A uma temperatura superior à da gelatinização, a quebra das ligações de hidrogênio é prolongada e as moléculas de água são ligadas aos grupos hidroxila, o que causa maior inchaço dos grânulos (XIE *et al.*, 2006). O poder de expansão do amido varia, levando em consideração diversos fatores: o nível de temperatura e a origem botânica são os dois principais. Por exemplo, a fécula de mandioca tem um nível de solubilidade de 0,79 a 084 g/g a 50°C (FALADE; IBANGA-BAMIJOKO; AYETIGBO, 2019). Dependendo da fonte botânica, o nível de solubilidade do amido resultante também pode ser maior ou menor, porque o tamanho dos grânulos de amido varia de uma variedade para outra (FALADE; IBANGA-BAMIJOKO; AYETIGBO, 2019; FERNANDES *et al.*, 2019; TAPPIBAN *et al.*, 2020a). Em baixa temperatura, a solubilidade do amido diminui, por outro lado, em alta temperatura ou em temperaturas acima de 70°C, a solubilidade é maior (HARTATI; AJIE; HARTATI, 2020). Finalmente, o nível de solubilidade depende da proporção e estrutura das moléculas de amilose e amilopectina que formam os grânulos (FALADE; IBANGA-BAMIJOKO; AYETIGBO, 2019; HARTATI; AJIE; HARTATI, 2020), mas também da presença de outros compostos, particularmente lipídios (HARTATI; AJIE; HARTATI, 2020).

### **2.8.3 Retrogradação**

Uma dispersão de amido que foi submetida a um tratamento a uma temperatura acima da temperatura de transição vítrea causa desorganização da estrutura cristalina do amido.

Durante o resfriamento dessa dispersão, ocorre a reorganização estrutural (FERNANDES *et al.*, 2019; TAPPIBAN *et al.*, 2020a). Em alguns casos, a reorganização da estrutura cristalina é acompanhada por sinérese que consiste na expulsão do excesso de água do gel (FERNANDES *et al.*, 2019). De fato, a reorganização, após a gelatinização da estrutura das cadeias de amido, em uma estrutura diferente, tem o efeito de modificar as suas propriedades físicas (TAPPIBAN *et al.*, 2020b).

Fernandes *et al.* (2019) mostraram que as propriedades térmicas do amido retrogradado são alteradas negativamente em comparação com as do amido gelatinizado. De fato, durante a retrogradação, o rearranjo da amilopectina, durante o armazenamento em baixa temperatura, é feito de forma menos ordenada, resultando em uma modificação das propriedades térmicas. A retrogradação é influenciada por certos parâmetros, como tempo e temperatura de armazenamento, conteúdo de amilose e fósforo, proteínas e oligossacarídeos (TAPPIBAN *et al.*, 2020).

## 2.9 Modificação dos amidos

O amido nativo apresenta vários limites em relação às suas propriedades. Pode ser considerado como limite o fato de que certos amidos têm uma viscosidade elevada mesmo à baixa concentração, instabilidade ao frio e formação de géis opaco, etc. Esses fatores constituem limitações à utilização do amido, em indústria alimentícia, para a fabricação de alguns produtos (BASHIR; AGGARWAL, 2019). O amido nativo obtido pode ser submetido a tratamentos para a obtenção de amidos modificados com propriedades melhoradas. Existem vários tipos de modificações aplicadas aos amidos, isso vai depender das propriedades desejadas e das aplicações que serão feitas (CORNEJO-RAMÍREZ *et al.*, 2018; GARCIA *et al.*, 2016). As principais modificações que nós relatamos podem ser agrupadas em modificações químicas, enzimáticas, genéticas e físicas.

A modificação química do amido é feita pela introdução de novos grupos funcionais, como na estrutura química do amido por tratamento com reagentes químicos, isso sem modificação na estrutura física, na forma e tamanho da molécula. Esses grupos são principalmente os grupos hidroxipropila, hidroxietila, metila e acetila (MACHADO, 2020; NAWAZ; WAHEED; NAWAZ, 2020). A introdução dos grupos químicos são feitos, em nível sítio específico, que são três grupos hidroxila reativos encontrados em cada unidade de glicose das moléculas de amilose e amilopectina (NAWAZ; WAHEED; NAWAZ, 2020). Isso contribui nas alterações das suas propriedades físico-químicas, tais como gelatinização e

retrogradação pela cisão molecular, oxidação ou rearranjo molecular causado por esses grupos. Entre as modificações químicas, podemos destacar principalmente os processos de esterificação, eterificação e reticulação (cross-linking), hidrólise ácida e oxidação (MACHADO, 2020).

As modificações físicas do amido são feitas sobre influência de fatores como moagem, umidade, temperatura, pressão, pH, radiação, ondas ultrassônicas, campo elétrico de pulso, etc. Esses fatores provocam mudança na morfologia e na estrutura tridimensional do amido que, no final, resultam na variação, em tamanho de partícula, propriedades de superfície, índices de solubilidade e propriedades funcionais, como absorção de água, capacidade de intumescimento, capacidade de colagem e gelificação do amido (NAWAZ; WAHEED; NAWAZ, 2020). Assim as propriedades funcionais são influenciadas e, dependendo da modificação aplicada, o amido se torna mais adequado para diversas formulações nutricionais, farmacêuticas e industriais.

Existem, hoje em dia, vários métodos de modificação física, porém os mais comuns são o superaquecimento de amido, tratamento de inibição térmica, tratamentos de radiação (UV e gama), tratamento por micro-ondas, pré-gelatinização, recozimento, tratamento por calor e umidade, aquecimento a seco, tratamento de pressão controlada instantânea, pulverização, tratamento de congelamento-descongelamento, etc. (BASHIR; AGGARWAL, 2019; NAWAZ; WAHEED; NAWAZ, 2020).

A modificação enzimática ocorre pela reação do amido com enzimas, principalmente incluindo enzimas hidrolisantes, que tendem a produzir derivados altamente funcionais. As enzimas como a  $\alpha$ -amilase,  $\beta$ -amilase, glucoamilase, pululanase e isoamilase são as mais comuns a serem empregadas nos processamentos de modificação enzimáticas dos amidos. Durante o processo de hidrólise, as enzimas atacam as ligações  $\alpha$ -(1 $\rightarrow$ 4) e/ou  $\alpha$ -(1 $\rightarrow$ 6), despolimerizando o amido em glicose, maltose e/ou oligossacarídeos (KRITHIKA; RATNAMALA, 2019), embora esses efeitos sejam reduzidos em amidos com baixo teor de amilose e alto poder de inchamento (UTHUMPORN; ZAIDUL; KARIM, 2010). A ação das enzimas sobre o amido causa uma desintegração dos grânulos, reduz a capacidade de retenção de água e diminui a viscosidade. A modificação enzimática contribui, para a produção de amilopectina e amilose altamente ramificadas, que são amidos com baixa digestibilidade e alta solubilidade em água desejável na indústria de bebidas (LEE *et al.*, 2008).

## **2.10 Interação com outros constituintes alimentares**

O amido presente em uma mistura tem a capacidade de reagir diretamente com as outras moléculas presentes, dependendo de sua natureza. A interação do amido com os demais componentes é responsável por modificar suas propriedades funcionais e comportamento durante o cozimento, armazenamento e digestibilidade (CORNEJO-RAMÍREZ *et al.*, 2018; PARADA; SANTOS, 2016).

### **2.10.1 Interação com outros carboidratos**

Os outros carboidratos interagem em solução com o amido, causando um aumento proporcional na temperatura de gelatinização e na viscosidade (ALLAN; CHAMBERLAIN; MAUER, 2020; PERRY; DONALD, 2002). De fato, existe uma relação linear entre a disponibilidade de água e a temperatura de gelatinização para uma composição homóloga. Portanto a presença de carboidratos, como açúcares, contribui para modificar a disponibilidade de água, o que retarda a gelatinização. Assim, para garantir a gelatinização do amido, em um preparo com muito açúcar, quando a temperatura de cozimento não pode ser aumentada, utilizam-se amidos com baixa temperatura de gelatinização. Segundo Babić *et al.* (2009), as interações entre o açúcar (glicose, sacarose, sucralose, etc) e o amido, também, permitem evitar a difusão muito rápida da água nos grânulos, para estabilizar a matriz de amido e assim inibir a retrogradação. Tem sido estudado que os carboidratos influenciam consideravelmente as propriedades gerais do amido, porém o efeito depende do tipo de carboidrato, da natureza do amido. Sob certas condições, dependendo da estrutura do carboidrato, seu volume molar e o número de grupos hidroxila exocíclicos, as interações carboidrato-amido podem ser realizadas, o que afeta as propriedades do amido principalmente a temperatura de gelatinização. Allan, Chamberlain e Mauer (2020) conseguiram perceber em seu estudo que adoçantes com 12 átomos de carbono, geralmente, aumentavam a temperatura do gel do amido de trigo mais que adoçantes, contendo seis átomos de carbono, quando comparados a concentrações iguais de unidades de monossacarídeos.

### **2.10.2 Interação com lipídios**

As interações entre os lipídios e o amido, em solução aquosa não aquecida, são fracas, porque, em nível dessas soluções, as moléculas de amilose não estão disponíveis, para serem

complexadas pelas moléculas de lipídeos, pois permanecem presas ou sequestradas dentro dos grânulos (VASILIADOU; RAPHAELIDES; PAPASTERGIADIS, 2015). No entanto, durante o cozimento, podem ocorrer complexações de lipídios monoacilados com a amilose presente no meio e nos grânulos. A formação do complexo, entre lipídio e amilose, que é moderadamente solúvel, causa um atraso no inchaço do amido por insolubilizações da amilose (PARADA; SANTOS, 2016). O retardo do inchaço pode ser mantido até atingir uma temperatura acima de 85°C, isso também depende da presença de ácidos graxos de cadeia longa (VASILIADOU; RAPHAELIDES; PAPASTERGIADIS, 2015). No resfriamento, a gordura interage com o amido e ajuda a prevenir a retrogradação. Na verdade, os lipídios monoacilados formam um complexo com a amilose, evitando assim a reestruturação das moléculas de amilose (PARADA; SANTOS, 2016).

### **2.10.3 Interação com proteínas**

Uma vez que o amido é uma molécula neutra e as proteínas são moléculas carregadas, o amido e as proteínas solúveis são duas moléculas cujas interações são inerentemente complexas (PARADA; SANTOS, 2016). Em geral, proteína e amido em solução estabelecem uma relação competitiva pela água no meio, espaço para expansão e gelificação (FANARI *et al.*, 2019). Estudos realizados com o amido de arroz, citado por Parada e Santos (2016), mostraram que, durante a gelatinização, as proteínas podem restringir a difusão da água nos grânulos, colocando-se na interface ou nos seus espaços vazios.

Na presença de proteínas, como, por exemplo, proteínas do glúten, observa-se um aumento da temperatura de gelatinização do amido. E essa temperatura máxima aumenta, à medida que a proporção glúten / amido aumenta (FANARI *et al.*, 2019). Lavoisier e Aguilera (2019) e Parada e Santos (2016) mencionaram que as proteínas do glúten ou outras proteínas (exógenas ou não) podem formar uma barreira cobrindo os grânulos de amido. Isso pode ser visto, em produtos de panificação, nos quais a expansão do amido é limitada por um complexo formado por proteínas do glúten.

O amido pode não apenas atuar como um enchimento inerte, mas também interagir com as proteínas (LI *et al.*, 2019). Por exemplo, como mencionado por Téllez-Morales *et al.* (2020), os tratamentos de extrusão de amido e proteínas podem levar a mudanças químicas e estruturais, como gelatinização do amido, desnaturação de proteínas, formação de complexos entre amilose e lipídios e outras reações. Essas alterações permitem que os dois compósitos contribuam para

a estabilidade tridimensional da rede e para a melhoria das propriedades técnico-funcionais e nutricionais da nova rede de biopolímeros.

## **2.11 Fécula de mandioca**

Além da tradicional farinha de mandioca, existem mais de 200 produtos derivados da mandioca, entre eles a fécula, também conhecida como polvilho. De acordo com o teor de acidez e categorizado em doce ou azedo (PEREIRA *et al.*, 2016), o polvilho é encontrado principalmente em todos os países da América do Sul. A Legislação Brasileira regulamentada pela Comissão Nacional de Normas e Padrões para Alimentos (CNNPA) define o polvilho como um produto farináceo extraído das partes subterrâneas comestíveis de tubérculos, raízes e rizomas da mandioca (COMISSÃO NACIONAL DE NORMAS E PADRÕES PARA ALIMENTOS - CNNPA, 1979).

### **2.11.1 Polvilho doce e azedo**

Do ponto de vista da fabricação, o polvilho doce é similar à fécula de mandioca, é obtido após os processos de lavagem da massa, seguido da decantação, para separar o amido de fibras, de material proteico e de impurezas e, enfim da secagem, depois da decantação. O polvilho doce passa por uma curta etapa de fermentação durante o processo de fabricação. A proporção de amilose, encontrada no amido de algumas variedades de mandioca, pode variar, em média, de 24.8 a 27.6% (ALCÁZAR-ALAY; ANGELA; MEIRELES, 2015; TAPPIBAN *et al.*, 2020). De acordo com um estudo de Díaz *et al.* (2018), comparando quatro polvilhos azedos, comercialmente disponíveis, com o polvilho doce e azedo de produção em laboratório, a proporção de amilose, contida no polvilho doce e no azedo, está dentro da faixa de 15 a 25%, sem diferença perceptível entre os dois tipos.

O polvilho azedo é considerado como um amido modificado quimicamente e enzimaticamente, por meio de processo de fermentação natural do amido nativo, durante um período variando de 60 a 90 dias, seguido de uma secagem (PENIDO, 2013). A fermentação é a origem da oxidação dos grupos redutores a grupos carboxílicos das lamelas amorfas. Nessa região do grânulo, as moléculas de amilose são mais acessíveis, o que faz com que elas sejam mais susceptíveis à oxidação. De maneira geral, houve a diminuição do pH, a formação de ácidos orgânicos, o aumento da acidez titulável, o ataque de enzimas amilolíticas, o aumento do poder de inchamento, da solubilidade e a diminuição da viscosidade do amido (OLIVEIRA,

2016). O polvilho é categorizado em doce ou azedo, de acordo com o teor de acidez titulável. No polvilho doce, a proporção de amilose é menor que o polvilho azedo, pois ela diminui com o nível de acidez (GARCIA *et al.*, 2016).

O polvilho doce possui uma temperatura de pico de gelatinização entre 61 e 68°C (WATERSCHOOT *et al.*, 2015). O amido de mandioca ácido gelatiniza a uma temperatura inferior à temperatura de gelatinização do amido de mandioca doce, tem a capacidade de expandir, quando cozido sem adição de trigo ou fermento. Essa propriedade justifica sua utilização, em vez do polvilho doce na culinária, bem como na indústria de alimentos para a fabricação de biscoitos de polvilho e de pão de queijo (MARASCHIN; REGINA, 2009; OLIVEIRA, 2016; PEREIRA *et al.*, 2016). O aumento do poder de expansão característico do polvilho azedo é o resultado da combinação entre a fermentação e o método de secagem específico. Assim, uma exposição à luz solar sem fermentação ou adição de ácido láctico não contribui para obter propriedades de expansão desejáveis do produto. Comparando a secagem mecânica com a secagem ao sol, esse último contribui para obtenção de um grau de expansão maior (MARASCHIN; REGINA, 2009).

## 2.12 Amido de milho

A produção mundial de amido é aproximadamente constituída de mais de 80% de amido de milho (ABOTBINA *et al.*, 2020). O amido constitui o maior constituinte dos grãos de milho, ou seja, encontra-se em uma proporção entre 64-80% (ABOTBINA *et al.*, 2020; YU; MOON, 2021). O restante é constituído de uma quantidade de proteína equivalente a 0,35% e de lipídeos por uma proporção de 0,8% (PALANISAMY *et al.*, 2020). O amido de milho comum é constituído de cadeia linear de amilose, em uma proporção entre 20 a 28 %, o resto é constituído de amilopectina e de outros compostos secundários, como proteínas, lipídios e minerais cuja quantidade varie em função da fonte botânica (ABOTBINA *et al.*, 2020; ALCÁZAR-ALAY; ANGELA; MEIRELES, 2015). A extração do amido de milho feita à moagem úmida consiste em uma primeira etapa de maceração dos grãos seguido da moagem (JI; SEETHARAMAN; WHITE, 2004; YU; MOON, 2021). A maceração é feita, usando uma mistura de água e ácido sulfuroso diluído por 24 a 48 h. Essa operação permite melhor separação das frações constituintes dos grãos, ou seja, o germe, o amido, glúten e fibra. A segregação desses constituintes é realizada, de acordo com as propriedades físicas (YU; MOON, 2021). Quer seja na forma nativa ou modificado, o amido de milho é utilizado como ingredientes, em vários processos em indústria alimentícia e não alimentícia (ABOTBINA *et al.*, 2020). O amido de

milho possui uma temperatura de pico de gelatinização entre 68 e 71°C (WATERSCHOOT *et al.*, 2015).

## 3 MATERIAL E MÉTODOS

### 3.1 Material

Três amidos diferentes, definidos como polvilho doce (PVD - Amafil Ltda - Brasil), polvilho azedo (PVA - Amafil Ltda, Brasil) e amido de milho (AM - Pacha Alimentos, Brasil) foram avaliados neste trabalho. Também foi utilizado o concentrado de proteína de soro de leite, contendo 80% de proteína (WPC80) e o óleo de soja (Liza - fabricante, Brasil) para o preparo das emulsões.

As análises experimentais foram realizadas nos laboratórios do Departamento de Ciência dos alimentos (DCA), Laboratório de Produtos Lácteos, Laboratório de Refrigeração de Alimentos; Laboratório de Microscopia do Departamento de Fitopatologia e Centro de Prospecção Química do Departamento de Química da UFLA.

### 3.2 Análises físico-químicas

#### 3.2.1 Análise da composição centesimal

Os seguintes parâmetros foram determinados nessas análises, tais como descrito:

- a) umidade, teor de cinzas foram realizadas pelo método gravimétrico;
- b) teor de lipídios foi realizado pelo método de Soxleth (usando o éter de petróleo para a extração);
- c) teor de proteínas foi realizado pelo método Kjeldhall em três etapas (digestão, destilação; titulação). A conversão para proteína foi feita por  $N \times 6,25$  (ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS - AOAC, 1980);
- d) teor em carboidratos foi calculado pela diferença dos outros componentes da amostra.

As seguintes análises foram feitas, para a determinação da composição centesimal do concentrado proteico de soro de leite, conforme metodologias descritas por Castelo *et al.* (2015):

- a) a umidade foi determinada por método gravimétrico em estufa (105 °C);
- b) a análise do teor de cinzas pelo método gravimétrico;
- c) a análise do teor em lipídios foi feita pelo método de Soxleth;

d) a análise do conteúdo proteico foi realizada pelo método Kjeldhal.

Todas as análises foram realizadas em triplicata.

### 3.2.2 Determinação do pH

Para a determinação do pH dos amidos, 5 g de cada amido foram pesados em balança analítica e colocados em béqueres de 25 mL contendo 10 mL de água. A solução foi bem misturada e, em seguida, o pH foi testado, usando um medidor de pH (QUIMIS modelo Q400AS).

### 3.2.3 Preparação dos géis

As soluções de amido, de proteína e dos complexos de amido-proteína foram preparadas, de acordo com os métodos de Guo *et al.* (2021) e Wagoner e Foegeding (2017), descritos da seguinte forma:

A preparação de soluções estoque, contendo 2,5% (P/V) de proteína de soro, foi feita, dissolvendo o concentrado proteico de soro em água deionizada sob agitação a 300 rpm por 3 minutos. A solução foi, em seguida, aquecida a 90 °C, em banho-maria, por 30 minutos com agitação manual. A solução proteica, após a preparação, foi resfriada à temperatura ambiente e armazenada a 5 °C por 12 h.

As soluções de amido 5% (P/V) foram obtidas, misturando com agitação (300 rpm durante 3 minutos), os amidos com água deionizada. A mistura foi depois aquecida, em banho-maria, a 90 °C por 30 minutos com agitação manual e, finalmente, resfriada à temperatura ambiente para ser armazenada a 5 °C por 12h.

As soluções estoque dos complexos amido-proteína foram obtidas pela dissolução dos dois constituintes com agitação (500 rpm durante 3 minutos) em água deionizada. Isso foi feito de forma a se ter soluções, cuja concentração de proteína fosse fixada em 2,5%, com concentrações dos diferentes amidos, variando da seguinte forma; 2,5%, 5%, 7,5%. As soluções estoque do complexo foram depois aquecidas, em banho-maria, a 90 °C por 30 min, com agitação manual, resfriadas à temperatura ambiente e armazenadas a 5 °C por 12 h antes da realização das análises.

Após a preparação e resfriamento, os pH's de todas as soluções foram ajustados para pH 7 usando NaOH 1M e HCl 0,1M.

### 3.2.4 Caracterização dos géis

#### 3.2.4.1 Análise do comportamento reológico

As medições reológicas foram realizadas, utilizando um viscosímetro rotacional com cilindros concêntricos Brookfield DVIII Ultra (Brookfield Engineering Laboratories, Stoughton, EUA), utilizando o adaptador para pequenas amostras 13R/RP (19,05 mm de diâmetro e 64,77 mm de profundidade; Brookfield Engineering Laboratories, Stoughton, EUA). As medidas foram realizadas à temperatura ambiente (25-30 °C) com 4 repetições. O spindle SC4-25 foi usado, para os géis com 5% e 7,5 % de amido e o spindle SC4-31, para os géis com 2,5 % de amido. As amostras foram submetidas a uma taxa crescente de deformação de rampa 4-34/s. O modelo Lei da Potência (Eq. 1) foi ajustado aos dados de tensão de cisalhamento e taxa de deformação para determinar o perfil de fluxo dos fluidos (STEFFE, 1996).

$$\sigma = k\dot{\gamma}^n \quad (1)$$

em que  $\sigma$  – tensão de cisalhamento (Pa),  $\dot{\gamma}$ - taxa de deformação ( $s^{-1}$ ),  $k$  – índice de consistência (Pa.s) e  $n$  – índice de comportamento de fluxo (adimensional).

#### 3.2.4.2 Análise por microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Para a realização da microscopia eletrônica de varredura, os géis formados pelos complexos soro-amido foram rapidamente colocados em um ultrafreezer a  $-75^{\circ}\text{C}$ , antes de serem levados a um liofilizador (Edwards, modelo L4KR, Brasil), a  $-40^{\circ}\text{C}$  e pressão de vácuo de 0,998 mbar por 48 horas. As amostras liofilizadas foram fixadas com fita de carbono de dupla face em suportes de alumínio (stubs) e revestidos sob vácuo com uma fina película de ouro metálico usando um evaporador SCD 050 modelo Bal-Tec (Balzers, Liechtenstein). Um microscópio eletrônico de varredura modelo nano technology systems (Carl Zeiss, Oberkochen, Alemanha), modelo Evo microscópio eletrônico de varredura 40 VP, foi usado para obter imagens digitais a 4000X.

### 3.2.5 Preparação de emulsões

Emulsões foram preparadas, de acordo com o método descrito por Guo *et al.* (2021). Nesse método, 25 g de solução de proteína ou soluções complexas (soro-amido) e 75 g de óleo de soja foram homogeneizados a 10000 rpm por 3 min. As emulsões preparadas foram então mantidas à temperatura ambiente por 12 horas para formar gel. Antes e depois da homogeneização, os volumes das emulsões preparadas foram medidos para o cálculo das capacidades e das estabilidades emulsificantes.

### 3.2.6 Caracterização das emulsões

#### 3.2.6.1 Capacidade emulsificante e estabilidade das emulsões

A capacidade emulsificante (CE) e a estabilidade da emulsão (ES) dos hidrocoloides foram determinadas segundo Lima Junior *et al.* (2013). A capacidade emulsificante e a estabilidade das emulsões foram calculadas utilizando as Equações 2 e 3, respectivamente.

$$EC (\%) = \frac{\text{emulsion volume}}{\text{total fluid volume}} \times 100 \quad (2)$$

$$ES (\%) = \frac{\text{final emulsion volume}}{\text{total fluid volume}} \times 100 \quad (3)$$

O “emulsion volume” é o volume, após agitação mecânica e homogeneização (mL), o “total fluid volume” é o volume, depois que o óleo de milho e as soluções de complexos foram pesados juntos e o “final emulsion volume” é o volume da emulsão, após o processo de desestabilização ao banho-maria (20°C e a 80°C), seguido de uma centrifugação.

#### 3.2.6.2 Microscopia de fluorescência

A análise da microestrutura das emulsões foi realizada no microscópio de epi-fluorescência vertical Leica DM2000, utilizando o software LAS v.4 com uma câmera (Image Program AxioVision 4.6, Zeiss PEG). As fotomicrografias foram obtidas, utilizando fluorocromos: red Nile e Rhodamine B P.A. (Dynamic CAS [81-88-9]).

### **3.3 Análise estatística**

Para a análise estatística, todos os dados foram obtidos de três replicatas. Os resultados foram apresentados na forma de valores médio  $\pm$  desvio-padrão, se aplicável. A análise estatística foi realizada, utilizando os procedimentos de análise de variância, no software SAS (STEFFE, 1996), considerando uma margem de erro significativa  $p < 0,05$ . A comparação entre as médias foi feita por meio do teste de Tukey HSD.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Composição centesimal

Os produtos utilizados, para a preparação dos géis e das emulsões, apresentaram as seguintes características de composição centesimal.

Tabela 3 - Resultado das análises de composição centesimal

<b>Produtos</b>	<b>Proteína (%)</b>	<b>Carboidratos (%)</b>	<b>Gordura (%)</b>	<b>Cinza (%)</b>	<b>Umidade (%)</b>
PVD	1,75	83,23	1,25	0,08	13,78
PVA	1,34	84,64	0,6	0,09	13,32
AM	1,63	84,72	0,72	0,08	13,07
WPC	72,94	11,79	1,05	2,53	11,62

Fonte: Do autor (2022).

### 4.2 pH dos produtos

Os produtos utilizados, na preparação dos géis, apresentaram características ácidas. Os valores do pH são apresentados na Tabela seguinte. Os valores de pH, obtidos para polvilho doce e polvilho azedo, coincidem com os valores obtidos por Díaz *et al.* (2018).

Tabela 4 - Resultados das medidas do pH dos produtos

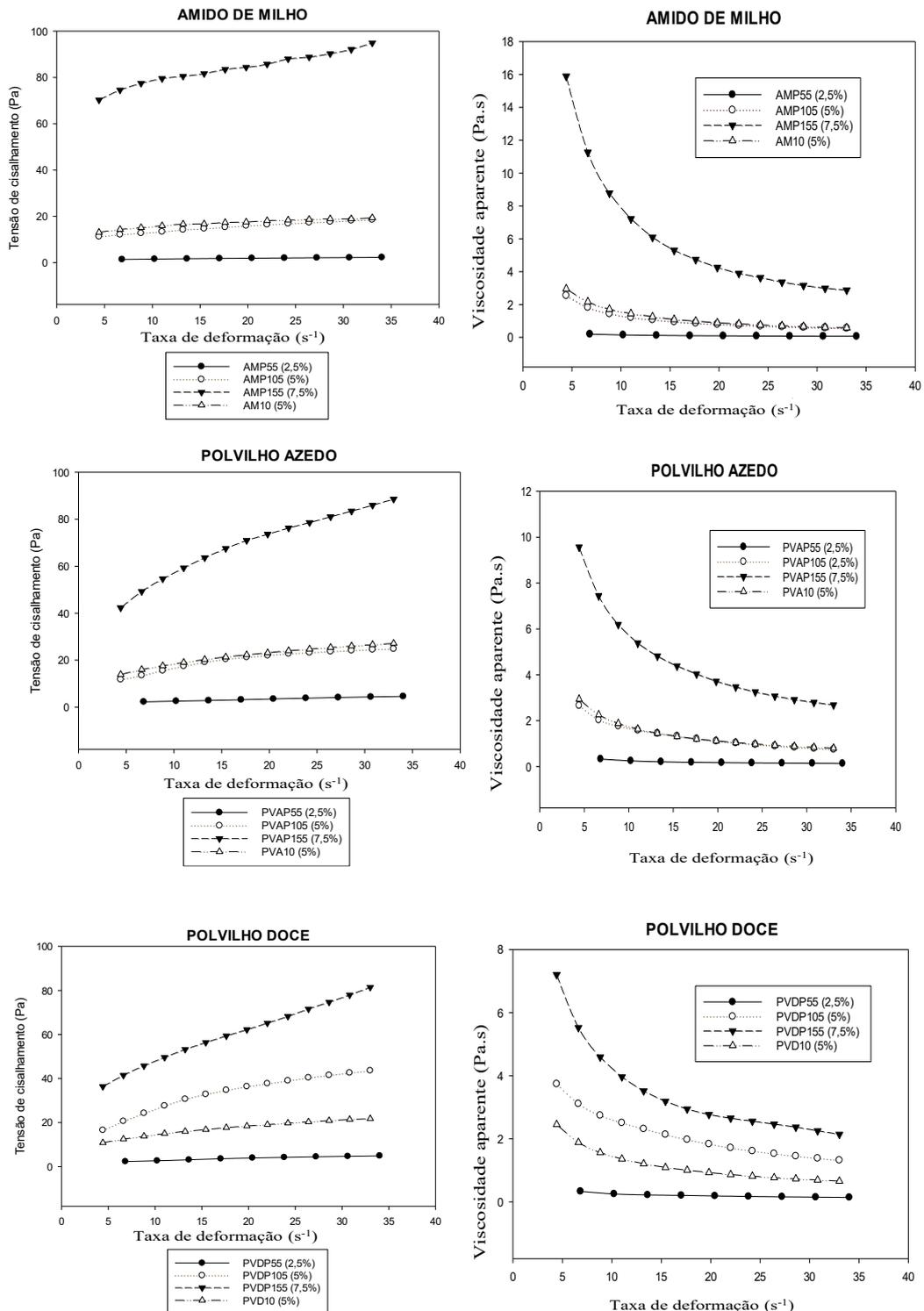
<b>Produtos</b>	<b>pH</b>
Proteína	6,0
Amido de milho	4,75
Polvilho doce	6,1
Polvilho azedo	3,18

Fonte: Do autor (2022).

### 4.3 Viscosidade e comportamento do fluxo

A Figura 7 mostra os resultados da tensão de cisalhamento, em função da taxa de deformação, para os diferentes tipos de amidos testados.

Figura 7 - Gráfico das análises de viscosidade e de tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação: AM10: 5% Amido de milho; AMP55: 2,5% amido de milho / 2,5% proteína; AMP105: 5% amido de milho / 2,5% proteína; AMP155: 7,5% amido de milho / 2,5% proteína; PVA10: 5% Polvilho azedo; PVAP55: 2,5% polvilho azedo / 2,5% proteína; PVAP105: 5% polvilho azedo / 2,5% proteína; PVAP155: 7,5% polvilho azedo / 2,5% proteína; PVD10: 5% Polvilho doce; PVDP55: 2,5% polvilho doce / 2,5% proteína; PVDP105: 5% polvilho doce / 2,5% proteína; PVDP155: 7,5% polvilho doce / 2,5% proteína



Fonte: Do autor (2022).

As curvas de tensão de cisalhamento versus taxa de deformação, bem como de viscosidade aparente versus taxa de deformação da Figura 7, mostram o caráter não newtoniano dos géis. Os pontos marcados representam os valores médios dos dados experimentais. A Tabela 4 mostra os valores médios e desvio-padrão do índice de comportamento do fluxo ( $n$ ) e índice de consistência ( $k$ ) para os tratamentos estudados ajustados de acordo com a lei da potência. Pode-se perceber que os valores de determinação do coeficiente ( $R^2$ ), para todos os tratamentos, foram superiores a 0,960; também o valor máximo de qui-quadrado observado foi de 2,515. Assim, esses resultados confirmam o bom ajuste para esse modelo. O teste de comparação de médias ( $p < 0,05$ ) mostra cinco grupos diferentes, para a variável índice de consistência ( $k$ ) e seis grupos diferentes, para a variável índice de comportamento do fluxo ( $n$ ).

Para as concentrações em amido superior a 2,5%, a viscosidade aparente diminuiu com o aumento da taxa de formação. No mesmo sentido, a medida que há aumento da taxa de deformação, a tensão de cisalhamento aumenta. Isso é observado de maneira mais relevante para as amostras de amidos puros (controle) e complexos cujas concentrações em amido foram de 5% e de 7,5%. Para os complexos AMP55, PVAP55 e PVDP55, cujas concentrações em amido são iguais a 2,5 %, a diminuição da viscosidade, com o aumento da taxa de deformação, é menos perceptível, pois percebemos que a tensão de cisalhamento ficou quase constante, embora haja aumento da taxa de deformação. De acordo com as curvas da Figura 7, pode-se notar que os géis com maior concentração em amido (7,5%) apresentaram maiores valores de tensão de cisalhamento e maiores valores de viscosidade aparente. A viscosidade possui uma correlação positiva com o aumento da concentração de amido, isso foi observado para os três amidos (PVD, PVA e AM). No mesmo sentido, percebemos que, à medida que a porcentagem de amido aumenta, o valor de “ $n$ ” se torna menor e o valor de “ $k$ ” maior.

Tabela 5 - Resultados dos parâmetros reológicos dos géis

Tratamentos	Lei da potência			
	k (Pa.S <sup>n</sup> )	n	R <sup>2</sup>	RMSE
AMP55 (2,5%)	0,867 ± 0,171 <sup>e</sup>	0,290 ± 0,015 <sup>cd</sup>	0,999	0,015
AMP105 (5%)	7,526 ± 0,681 <sup>d</sup>	0,253 ± 0,010 <sup>de</sup>	0,987	0,301
AMP155 (7,5%)	56,148 ± 0,938 <sup>a</sup>	0,142 ± 0,010 <sup>f</sup>	0,962	1,709
PVAP55 (2,5%)	0,941 ± 0,021 <sup>e</sup>	0,440 ± 0,030 <sup>a</sup>	0,975	0,145
PVAP105 (5%)	7,304 ± 0,487 <sup>d</sup>	0,360 ± 0,011 <sup>bc</sup>	0,983	0,653
PVAP155 (7,5%)	24,947 ± 1,469 <sup>b</sup>	0,360 ± 0,023 <sup>bc</sup>	0,998	0,776
PVDP55 (2,5%)	0,975 ± 0,074 <sup>e</sup>	0,458 ± 0,016 <sup>a</sup>	0,988	0,115
PVDP105 (5%)	9,157 ± 0,535 <sup>d</sup>	0,454 ± 0,039 <sup>a</sup>	0,988	1,022
PVDP155 (7,5%)	19,230 ± 2,515 <sup>c</sup>	0,397 ± 0,039 <sup>ab</sup>	0,992	1,670
PVA10 (5%)	8,537 ± 0,533 <sup>d</sup>	0,333 ± 0,022 <sup>bc</sup>	0,999	0,140
PVD10 (5%)	6,483 ± 0,126 <sup>d</sup>	0,348 ± 0,030 <sup>bc</sup>	0,999	0,116
AM10 (5%)	9,344 ± 1,437 <sup>d</sup>	0,214 ± 0,035 <sup>ef</sup>	0,960	0,507

R<sup>2</sup> coeficiente de correlação, RMSE raiz quadrada do erro médio, k é o índice de consistência (Pa s<sup>n</sup>), n é o índice de comportamento de fluxo (adimensional). Médias seguidas de mesmas letras minúsculas na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey (p<0,05).

Fonte: Do autor (2022).

Observemos diferenças significativas, em nível dos parâmetros de fluxo “k” e “n”, comparando os tratamentos com 2,5%, de 5% e de 7 % de amido. Isso já foi mencionado, na literatura, que o aumento da concentração em amido contribui para um aumento da viscosidade aparente do fluido, acompanhado pelo aumento do índice de consistência (k) e da diminuição do índice de comportamento do fluxo (n). Isso é característica de um aumento, na pseudoplasticidade, que pode ser pelo fato do maior grau de quebra estrutural, durante o cisalhamento, em maior concentração de amido (SINGH; GEVEKE; YADAV, 2016).

Pelas observações feitas no gráfico, a adição de concentrado proteico não contribuiu para uma mudança perceptível na viscosidade aparente do AM e do PVA. No entanto pode-se observar que a adição de proteína é a causa de uma leve diminuição da viscosidade, comparando as curvas das amostras AM10 com AMP105 e PVA10 com PVAP105. O efeito contrário foi observado, para o polvilho doce, em que percebemos que houve um aumento de viscosidade, comparando o controle (PVD10) com o complexo contendo proteína (PVDP105). O comportamento do fluxo seguiu o mesmo padrão descrito pelas curvas de viscosidade. Com os valores respectivos de k, em Pa.S<sup>n</sup>, de 9,157 ± 0,535, para o PVDP105, comparada com 6,483 ± 0,126 para o PVD10 e 7,526 ± 0,681 para o AMP105, comparada com 9,344 ± 1,437 para o AM10 e 7,304 ± 0,48 para o PVAP105 comparada com 8,537 ± 0,533 para o PVA10. Ou seja, comparando os tratamentos aos controles respectivos, percebe-se que a presença do concentrado de proteína contribuiu ao aumento de k para o polvilho doce, porém uma diminuição para o polvilho azedo e o amido de milho, mas de maneira não significativa. O concentrado de

proteína de soro contribuiu para o aumento significativo de  $n$  para o PVD e não significativo para o PVA e o AM. Esse resultado pode ser explicado pelo fato de que a interação amido e proteína é sujeita a vários fatores que podem levar a um comportamento diferente de um amido ao outro utilizado. Isso foi também observado no estudo de Carvalho, Onwulata e Tomasula (2007).

A principal explicação, para esse resultado, é que o comportamento da proteína que se mistura com o amido é influenciado pelo pH. Em condições de pH ácido ou próximo ao potencial isoelétrico das proteínas, como é o caso do AM e do PVA, as proteínas do soro tornam-se menos solúveis e reagem com moléculas de amilose e mais ligações dissulfeto intermoleculares são formadas (REN *et al.*, 2017). A formação desses complexos impede a retrogradação das moléculas de amilose presentes, conseqüentemente, uma redução da viscosidade. Ou seja, as proteínas do soro de leite desempenham um papel de resposta plastificante, em nível da mistura, que impede o rearranjo das moléculas de amilose pela redução da viscosidade (CARVALHO; ONWULATA; TOMASULA, 2007). No caso contrário, ou seja, em meio menos ácido, como é o caso do PVD, as proteínas tornam-se mais solúveis, tendo maior capacidade de retenção de água, desempenhando o papel de enchimento, sem impedir o rearranjo das moléculas de amilose. Essa é a origem do aumento da viscosidade.

Por isso, ao comparar os tratamentos PVD10 com PVDP105, observou-se um aumento na viscosidade aparente e um aumento significativo do parâmetro  $k$ . Por outro lado, comparando soluções de amido de milho puro (AM10) com mistura de amido de milho e proteína (AMP105), em que o nível de pH é mais próximo do pI das proteínas, não houve aumento do índice de consistência  $k$  com a adição de proteína. O mesmo resultado foi observado comparando as soluções de polvilho azedo puro (PVA10) com a mistura de polvilho azedo e proteína (PVAP105).

Os complexos formados com o concentrado de proteína e do amido apresentaram, de maneira geral, comportamentos específicos dos fluidos pseudoplásticos que são caracterizados pela diminuição da viscosidade e pelo aumento de tensão de cisalhamento com o aumento de taxa de deformação.

#### **4.4 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)**

A Figura 8 mostra fotomicrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) das amostras dos diferentes tratamentos.

Figura 8 - Fotomicrografias dos géis por MEV (Continua)

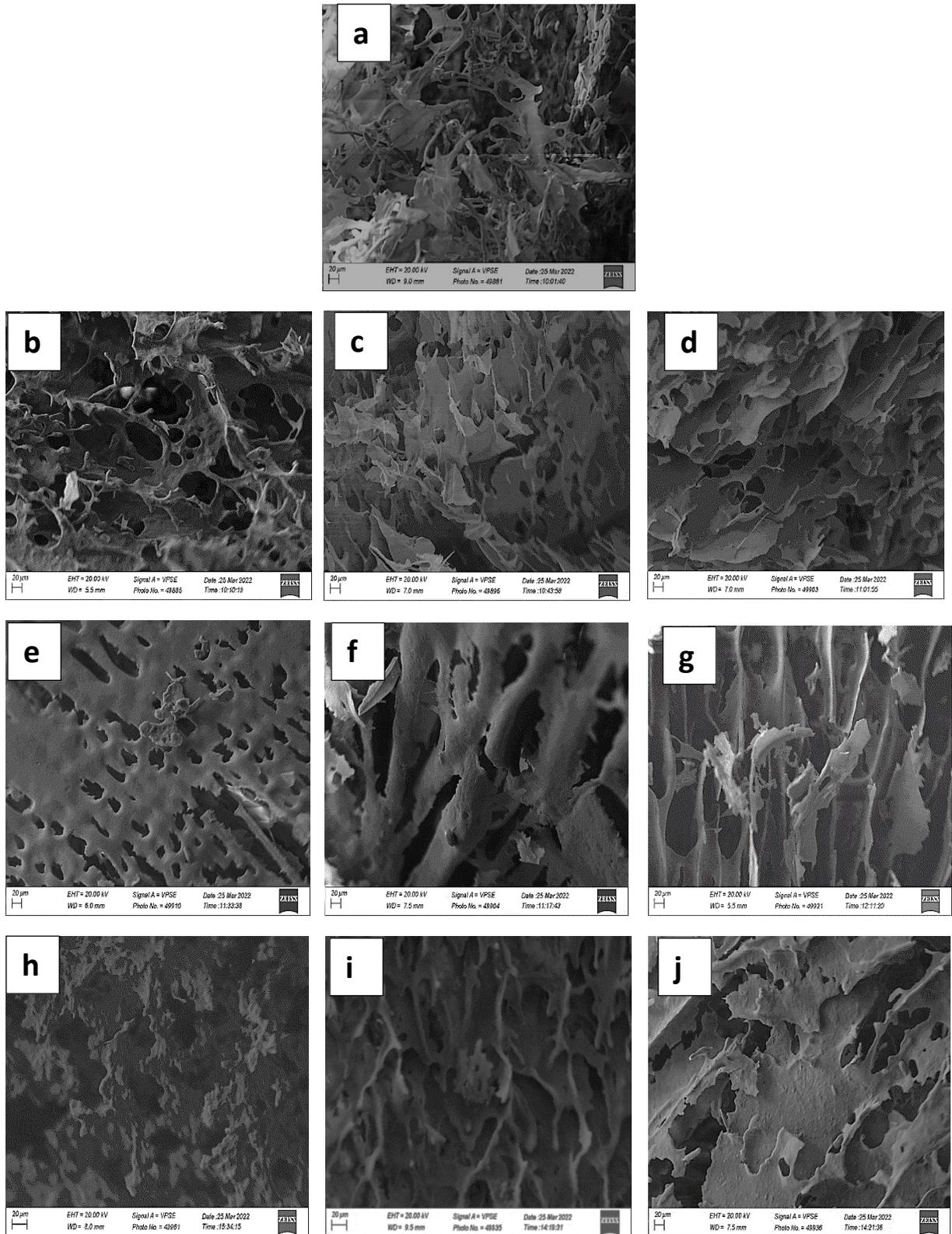
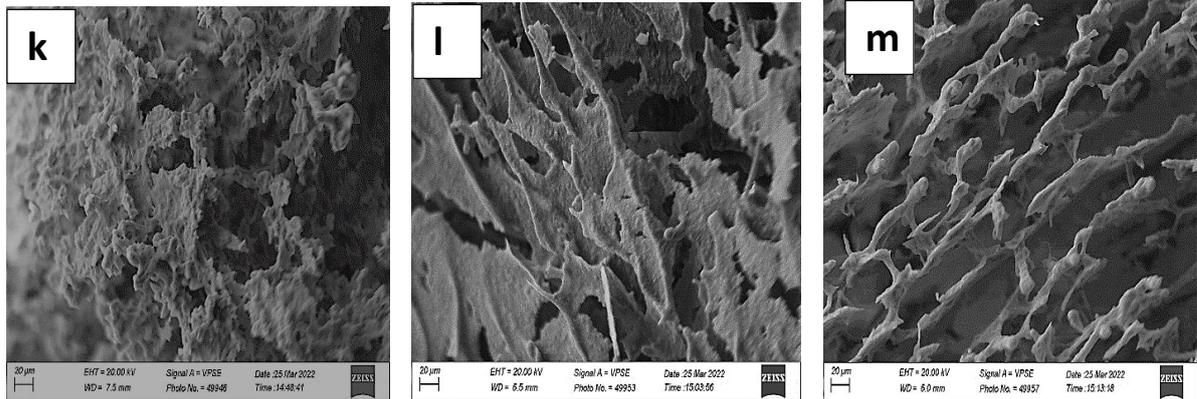


Figura 8 - Fotomicrografias dos géis por MEV (Conclusão)



Legenda: a) 2,5% Proteína (P5); b) 5% Amido de milho (AM10); c) 5% Polvilho doce (PVD10); d) 5% Polvilho azedo (PVA10); e) 2,5% amido de milho / 2,5% proteína (AMP55); f) 2,5% polvilho doce / 2,5% proteína (PVDP55); g) 2,5% polvilho azedo / 2,5% proteína (PVAP55); h) 5% amido de milho / 2,5% proteína (AMP105); i) 5% polvilho doce / 2,5% proteína (PVDP105); j) 5% polvilho azedo / 2,5% proteína (PVAP105); k) 7,5% amido de milho / 2,5% proteína (AMP155); l) 7,5% polvilho doce / 2,5% proteína (PVDP155); m) 7,5% polvilho azedo / 2,5% proteína (PVAP155).

Fonte: Do autor (2022).

O concentrado de proteína pura (FIGURA 8a) apresenta uma estrutura definida, em rede filamentosa, no qual podemos perceber os orifícios deixados pelos cristais de gelo, após a sublimação no processo de liofilização. Esses cristais formados pela água estão presentes na estrutura dos géis.

Para o amido de milho puro (FIGURA 8b), a estrutura apresentou filamentos irregulares pouco similares ao gel do concentrado proteico mostrado na Figura 8a. Os géis de polvilho doce e azedo (FIGURA 8c e FIGURA 8d) apresentaram estruturas laminares finas, lisas e regulares, em que também permaneceram os orifícios ocupados anteriormente pelo ar e pela água. Esse tipo de microestrutura também foi observado no estudo de Carvalho, Onwulata e Tomasula (2007). A presença de concentrado de proteína, nos géis de amido de milho, contribuiu para a obtenção de um gel de estrutura menos porosa e aparentemente mais opaco (FIGURA 8). Percebe-se que a opacidade dos géis aumenta com o aumento da concentração de amido (FIGURA 8e, FIGURA 8h e FIGURA 8k). Nos géis de PVD e PVA, as estruturas permanecem porosas e constituídas de uma rede de lâminas empilhada com a presença do concentrado proteico. Porém as proteínas contribuem para o emaramento da rede, para melhor preenchimento dos espaços. O aumento das concentrações de PVD e PVA, que constituem esses géis, contribuiu também, para aumentar a resistência da estrutura, deixando menos poros, como pode ser observado, comparando as Figuras 8f, 8i e 8l para o PVD e 8g, 8j e 8k para o PVA.

Destaca-se que, em nível dos géis formados pelos complexos PVD e concentrado de proteína, há presença de uma rede filamentosa bem distinta, em nível das camadas laminares, o que não aparece nos géis de PVA. Em geral, comparando os géis nativos formados de AM, PVD e PVA gelatinizado com os géis, contendo concentrado de proteína adicionada, os géis com proteína oferecem uma estrutura mais forte e sólida, com menos fragmentos e poros menores.

#### 4.5 Capacidade emulsificante e estabilidade

A Tabela 6 mostra os resultados para a estabilidade e da capacidade emulsificante dos complexos amido-proteína e da solução de proteína pura.

Tabela 6 - Resultados das análises de estabilidade e da capacidade Emulsificante

Tratamentos	Estabilidade (%)		Capacidade Emulsificante (mL/g)
	20°C	80°C	
AMP55 (2,5%)	95,818 ± 0,257 <sup>aA</sup>	95,455 ± 3,711 <sup>abAB</sup>	98,880 ± 1,226 <sup>a</sup>
AMP105 (5%)	30,051 ± 2,500 <sup>dF</sup>	32,593 ± 1,048 <sup>deEF</sup>	99,629 ± 0,907 <sup>a</sup>
AMP155 (7,5%)	31,572 ± 1,438 <sup>dF</sup>	38,456 ± 1,873 <sup>cdDE</sup>	100 ± 0,542 <sup>a</sup>
PVAP55 (2,5%)	98,667 ± 0,363 <sup>aA</sup>	97,778 ± 1,814 <sup>aA</sup>	95,185 ± 2,953 <sup>b</sup>
PVAP105 (5%)	43,620 ± 2,954 <sup>cdD</sup>	39,529 ± 2,415 <sup>cdD</sup>	97,382 ± 1,693 <sup>ab</sup>
PVAP155 (7,5%)	29,926 ± 0,913 <sup>dF</sup>	28,741 ± 0,554 <sup>eF</sup>	97,407 ± 2,953 <sup>ab</sup>
PVDP55 (2,5%)	96,669 ± 0,162 <sup>aA</sup>	95,758 ± 0,214 <sup>abA</sup>	97,097 ± 1,713 <sup>ab</sup>
PVDP105 (5%)	28,200 ± 2,267 <sup>dF</sup>	26,507 ± 0,700 <sup>eF</sup>	97,743 ± 2,434 <sup>ab</sup>
PVDP155 (7,5%)	30,013 ± 1,289 <sup>dF</sup>	27,290 ± 2,375 <sup>eF</sup>	99,629 ± 0,823 <sup>a</sup>
P5 (2,5%)	88,444 ± 0,629 <sup>bC</sup>	89,037 ± 1,826 <sup>bBC</sup>	97,777 ± 0,942 <sup>ab</sup>

Médias seguidas de mesmas letras minúsculas na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey (p<0,05).

Fonte: Do autor (2022).

Considerando a capacidade emulsificante, após tratamento térmico, observa-se que os efeitos dos diferentes tratamentos sobre a capacidade emulsificante apresentaram diferenças significativas (P < 0,05) que o teste de comparação de médias (p < 0,05) categorizou em dois

grupos diferentes. Os maiores valores de capacidade emulsificante obtidos, para os complexos AM/WPC, PVD/WPC e PVA/WPC, foram 100 mL/g, 99,6 mL/g e 97,4 mL/g, respectivamente, para uma concentração de amido igual a 7,5%.

Para as proteínas, o valor de capacidade emulsificante com 5% de proteína foi de 97,7 %. Observa-se que o aumento da concentração de amido contribuiu para o aumento de capacidade emulsificante, mas de maneira não significativa na maioria dos casos. Considerando a mesma porcentagem de solutos totais de 5% (2,5% amido e 2,5% proteína), os complexos amido/WPC apresentaram valores de capacidade emulsificante da ordem de 98,880mL/g; 95,185mL/g; 97,097mL/g, respectivamente, para AMP55, PVAP55 e PVDP55, respectivamente. Assim, os complexos AM/WPC apresentaram valores de capacidade emulsificante superiores aos demais amidos.

Com relação à estabilidade da emulsão, após tratamento térmico, observa-se, na Tabela 6, que os tratamentos apresentaram diferenças significativas na estabilidade das emulsões. Considerando as diferenças, o teste de comparação de médias ( $p < 0,05$ ) de Tukey categorizou, em quatro grupos diferentes para o tratamento térmico a 20°C e cinco grupos diferentes para o tratamento a 80°C.

Entre os três amidos testados, o complexo PVA/WPC apresentou os maiores valores de estabilidade da emulsão, sendo 98,6% a 20°C e 97,7% a 80°C para uma concentração de amido igual a 2,5%. Em seguida, vêm os de PVD e de AM, com valores de estabilidade de emulsão a 20°C de 96,7% e 95,8% e a 80°C de 95,7% e 95,4%, respectivamente. Porém não houve diferença significativa entre os valores de estabilidade dos diferentes tipos de amido para essa concentração (2,5% de amido); isso para ambas as temperaturas. Comparando a estabilidade a 20°C e 80°C das emulsões formadas de amido e proteína com a solução de proteína, sem amido P5 (controle), observam-se diferenças significativas nos valores da estabilidade das emulsões. Melhores estabilidades foram obtidas para as emulsões, contendo 2,5% de amido, quando comparadas com a amostra controle, porém, para as emulsões formadas com 5% e 7,5% de amido, a estabilidade das emulsões foi menor. De fato, a concentração em amido teve efeito significativo sobre a estabilidade da emulsão para ambos os tratamentos térmicos. Observa-se que as emulsões formadas com os géis contendo 2,5 % de amido apresentaram melhor nível de estabilidade que os outros. Esse é um resultado diferente do estudo de Guo *et al.* (2021), cujo aumento da concentração de amido favorece melhor nível de estabilidade. A explicação por trás dessa tendência contraditória é o fato de que a proporção amido/proteína deve ser, em um certo limite, que favorece o impedimento estérico das gotículas e não a floculação por depleção. A concentração crítica de floculação depende das características moleculares das moléculas de

polissacarídeos (GRUNDY *et al.*, 2018). Nota-se que a temperatura não teve efeito significativo na estabilidade das emulsões, de maneira geral, exceto para o AMP155, cujo valor de estabilidade a 80°C foi maior que a 20°C.

O resultado das análises de capacidade e estabilidade emulsificante mostra que a mistura de amido com proteínas, em função da proporção dessas duas últimas, permite obter um complexo capaz de formar melhores emulsões. Os complexos amido/WPC adsorvem melhor, na superfície óleo-água e formam uma interface mais densa que amido e WPC, para evitar a agregação de gotículas de óleo. Em outras palavras, o complexo permite ter impedimento estérico na interface e modificar a molhabilidade superficial do amido e do WPC (GUO *et al.*, 2021).

#### **4.6 Microscopia epifluorescencia**

As imagens da Figura 9 mostram as fotomicrografias das emulsões por microscopia de epi-fluorescência. O uso de fluorocromos permite demarcar e identificar os componentes da emulsão. Nas imagens, foram identificadas as gotículas de lipídeos cercadas pelas proteínas ou dos complexos amido/proteína, respectivamente, pelo uso dos corantes red Nile (1) e rodhamine B (2).

Figura 9 - Fotomicrografias das emulsões por microscopia epifluorescência (Continua)

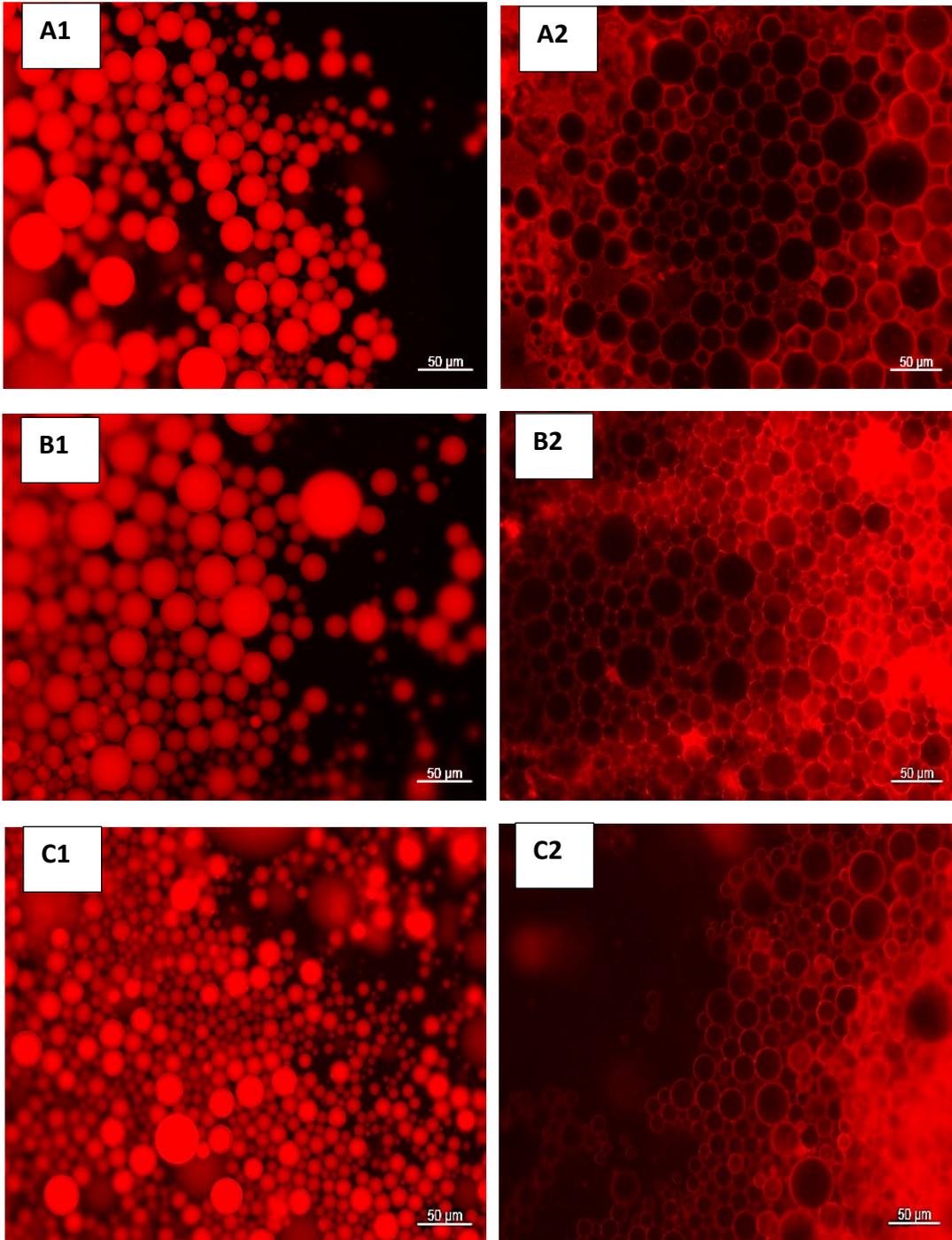


Figura 9 - Fotomicrografias das emulsões por microscopia epifluorescência (Continuação)

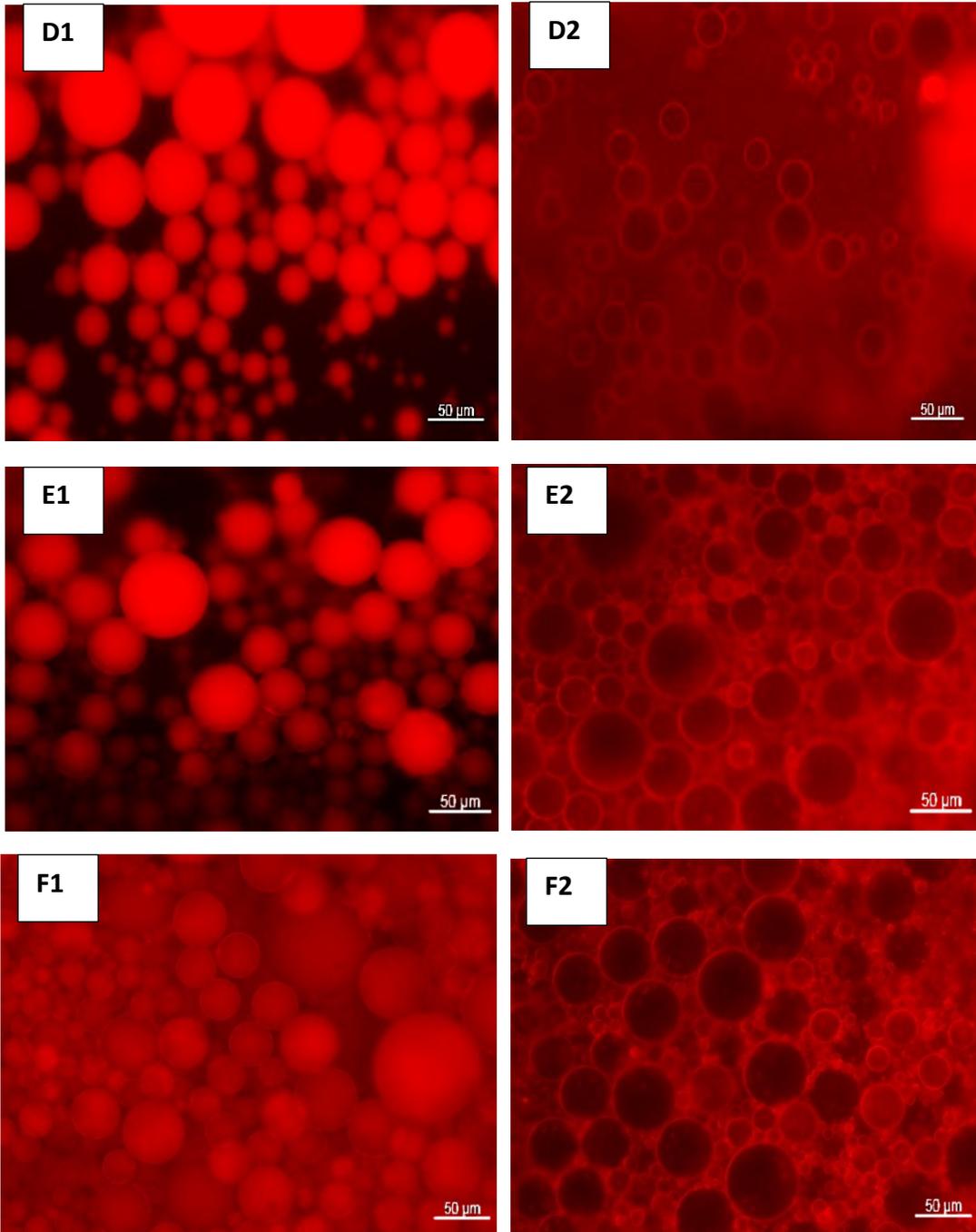


Figura 9 - Fotomicrografias das emulsões por microscopia epifluorescência (Continuação)

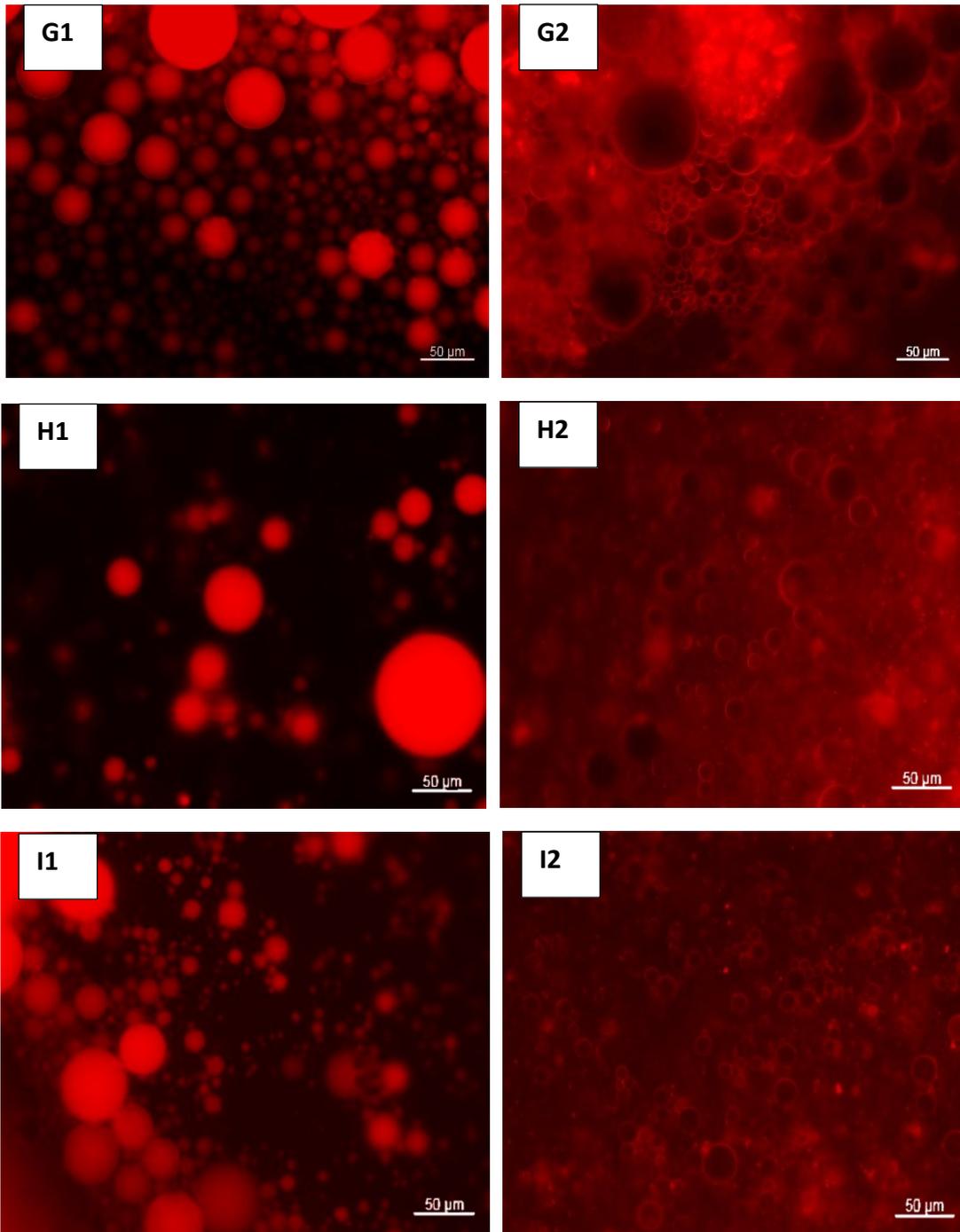
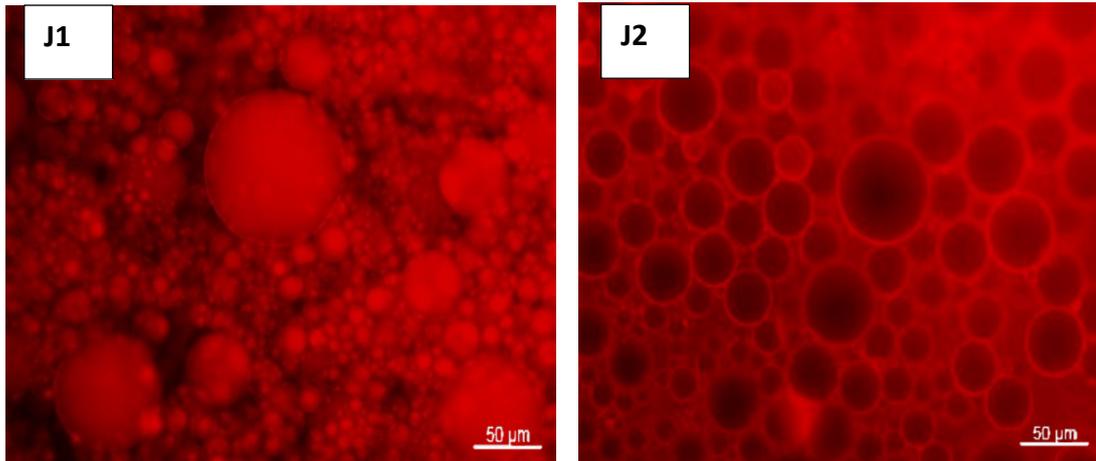


Figura 9 - Fotomicrografias das emulsões por microscopia epifluorescência (Conclusão)



Legenda: (A) 2,5% amido de milho / 2,5% proteína (AMP55);(B) 2,5% polvilho azedo / 2,5% proteína (PVAP55);(C) 2,5% polvilho doce / 2,5% proteína (PVDP55);(D) 5% amido de milho / 2,5% proteína (AMP105);(E) 5% polvilho azedo / 2,5% proteína (PVAP105); (F) 5% polvilho doce / 2,5% proteína (PVDP105);(G) 7,5% amido de milho / 2,5% proteína (AMP155); (H) 7,5% polvilho azedo / 2,5% proteína (PVAP155); (J) 7,5% polvilho doce / 2,5% proteína (PVDP155); (J)2,5% Proteína (P5); (1) Fluorocromo red Nile; (2) Fluorocromo rodhamine B. P. A.

Fonte: Do autor (2022).

De acordo com a literatura, o tamanho das gotículas de óleo está diretamente ligado à estabilidade da emulsão. Assim, as emulsões com tamanhos de gotículas menores tiveram um nível de estabilidade relativamente maior (GUO *et al.*, 2021; ZHU, 2018). A discussão sobre as imagens capturadas das emulsões será feita baseada no tamanho das gotículas de óleo. Desse modo, no que diz respeito ao tamanho das gotículas e da estabilidade das emulsões, as imagens mostraram que as emulsões que contêm uma concentração em amido de 2,5% apresentaram mais gotículas de diâmetros menores e poucas gotículas de diâmetro superior a 50  $\mu\text{m}$ . De acordo com os resultados obtidos, na seção de estabilidade, observa-se que as emulsões com gotículas de tamanhos menores são aquelas que apresentaram maior nível de estabilidade. Particularmente, as emulsões formadas pelo PVD (FIGURA 2A) apresentaram uma estrutura com tamanho de gotículas menor comparando com outros amidos.

Ao contrário de alguns estudos, observa-se que, nesse caso, a adição de amido não contribuiu significativamente para a diminuição do tamanho das gotículas de óleo. De fato, as Figuras 9 (A1, A2, B1, B2, C1, C2) mostram a presença de gotículas pequenas, com diâmetros < 50  $\mu\text{m}$ . Enquanto as Figuras 9 (D1, D2, E1 E2, F1, F2) mostram a presença de algumas gotículas pequenas, com diâmetros < 50  $\mu\text{m}$  e também gotículas maiores, cujo diâmetro é superior a 50  $\mu\text{m}$ . Enfim as Figuras 9 (G1, G2, H1, H2, I1, I1) apresentaram emulsões menos estáveis com menos gotículas definidas e gotículas maiores. Assim constatamos que, para todos

os tipos de amido, o aumento da concentração em amido contribuiu para formar emulsões menos estável, ou seja, com tamanho de gotículas maior. Isso pode ser pelo fato de que, em emulsões formadas, a partir de amido e proteína, a proporção amido/proteína, na fase contínua, atingiu o limite de flocculação e levou à flocculação por depleção. Esse fenômeno ocorre, em emulsões óleo-água, contendo diferentes tipos de biopolímeros. De fato, o aumento do teor de amido até um certo limite leva à obtenção de uma fase contínua de viscosidade muito alta. Da mesma forma, a ausência de uma proporção significativa de proteína, para a formação do complexo amido-proteína, leva à obtenção de polímero livre. A presença desses polímeros livres, em uma concentração crítica, leva à flocculação por exaustão (GRUNDY *et al.*, 2018; TADROS, 2013). Daí a diminuição da estabilidade da emulsão que pode ser observada pelo aumento do teor de amido.

Para as emulsões constituídas apenas de concentrado de proteína (FIGURA 9J1 e FIGURA 9J2), observa-se que o tamanho das gotículas de óleo das emulsões foi o maior, quando comparado à emulsão com concentração em amido de 2,5%. Isso significa que a adição de uma certa quantidade de amido foi benéfica para a estabilidade da emulsão.

## 5 CONCLUSÃO

O concentrado de proteína de soro teve um impacto positivo nas propriedades reológicas do gel de amido. Para AM e PVA, não houve grande alteração na viscosidade e no índice de fluxo com a adição de proteína. Para o PVD, a proteína do soro do leite contribuiu para a obtenção de géis com viscosidades maiores e dos aumentos significativos dos índices de fluxo. Os resultados também demonstraram, por análise de microscopia eletrônica, que o concentrado de proteína de soro favorece a obtenção de uma rede formada de amido e proteína tendo uma aparência muito mais rígida. A mesma observação foi feita para o aumento da concentração de amido. Essa percepção da rigidez do gel está diretamente ligada em nível de viscosidade.

A melhora das propriedades dos complexos se deve não só à ação das proteínas, mas também à do amido, no que diz respeito às propriedades emulsificantes. Assim, a adição de amido ao concentrado proteico de soro de leite, na maioria dos casos, permitiu obter compostos com propriedades emulsificantes melhoradas. Para as misturas contendo 2,5% de AM, de PVA e PVD, os valores das capacidades emulsificantes foram  $98,880 \pm 1,226$  mL/g;  $95,185 \pm 2,953$  mL/g e  $97,097 \pm 1,713$  mL/g. Esses valores de capacidade emulsificante tendem a aumentar com o aumento da concentração dos amidos. As emulsões formadas por complexos amido/proteína oferecem, também, em função da proporção desse último, uma estabilidade mais elevada que as soluções formadas apenas por proteínas. Uma concentração de AM de 2,5% permitiu obter valores de estabilidade das emulsões de  $95,818 \pm 0,257$  % a 20°C e de  $95,455 \pm 3,711$  % a 80°C, enquanto uma solução de 5% de proteína resultou em valores menores de estabilidade ( $88,444 \pm 0,629$  % a 20°C e  $89,037 \pm 1,826$  % a 80°C). Porém esses valores de estabilidade diminuem com o aumento da concentração de amido.

A análise por microscopia de epifluorescência permitiu entender as interações e confirmar o papel na melhoria da estabilidade causada pela adição de amido. Com efeito, essas propriedades reológicas e emulsificantes, melhoradas pela ação dos dois compostos, resultam das interações que ocorrem entre eles. Essas interações, embora complexas, dependem, em princípio, de fatores intrínsecos e extrínsecos, influenciando as propriedades da mistura. Os principais a considerar são, por um lado, o tipo e concentração de amido, o pH que atua na solubilidade das proteínas e as suas interações com as moléculas de amilose que condicionarão o nível de viscosidade. Por outro lado, a proporção em amido constituindo a fase contínua, durante a formação das emulsões, pode dar origem à floculação.

Os complexos amido/proteína apresentaram grande potencial de aplicação na indústria alimentícia pelas vantagens que oferecem tanto do ponto de vista reológico quanto para

emulsificação. Os três amidos combinados com concentrados proteicos apresentaram comportamentos diferentes. No que diz respeito ao aumento da viscosidade, o PVD apresentou maior potencial. Assim, pode ser aplicado na fabricação de um produto cuja viscosidade deve ser aumentada para garantir certa qualidade. No que diz respeito à formação de emulsão estável, o PVA apresentou melhores resultados, podendo, portanto ser aplicado na formação de produção do tipo maionese. Seria, em consequência, essencial realizar um estudo mais aprofundado para melhor compreender o funcionamento deste último.

## REFERÊNCIAS

- ABD EL-SALAM, M. H.; EL-SHIBINY, S.; SALEM, A. Factors affecting the functional properties of whey protein products: a review. **Food Reviews International**, New York, v. 25, n. 3, p. 251-270, 2009.
- ABOTBINA, W. A. M. *et al.* Review of cornstarch biopolymer. *In: POSTGRADUATE SEMINAR ON NATURAL FIBRE REINFORCED POLYMER COMPOSITES, 7., 2020, Seri Kembangan. Proceedings [...]. Seri Kembangan: INTROP, 2020.*
- ALCÁZAR-ALAY, S. C.; ANGELA, M.; MEIRELES, A. Physicochemical properties, modifications and applications of starches from different botanical sources. **Food Science and Technology**, Campinas, v. 35, n. 2, p. 215-236, June 2015.
- ALLAN, M. C.; CHAMBERLAIN, M. C.; MAUER, L. J. Effects of sugars and sugar alcohols on the gelatinization temperatures of wheat, potato, and cornstarches. **Foods**, Basel, v. 9, n. 6, p. 757, June 2020.
- ANDRADE, R. L. P. de; MARTINS, J. F. P. Influência da adição da fécula de batata-doce (*Ipomoea batatas* L.) sobre a viscosidade do permeado de soro de queijo. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 22, n. 3, p. 249-253, 2002.
- ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS. **Official methods of analysis**. 13<sup>th</sup> ed. Washington, DC: AOAC, 1980.
- BABIĆ, J. *et al.* Influence of trehalose, glucose, fructose, and sucrose on gelatinisation and retrogradation of corn and tapioca starches. **Czech Journal of Food Sciences**, Prague, v. 27, n. 3, p. 151-157, 2009.
- BAKS, T. *et al.* Comparison of methods to determine the degree of gelatinisation for both high and low starch concentrations. **Carbohydrate Polymers**, Barking, v. 67, n. 4, p. 481-490, 2007.
- BASHIR, K.; AGGARWAL, M. Physicochemical, structural and functional properties of native and irradiated starch: a review. **Journal of Food Science and Technology**, Trivandrum, v. 56, n. 2, p. 513-523, 2019.
- BRAVO-NÚÑEZ, Á.; GARZ, R.; ROSELL, C. M. Evaluation of starch: protein interactions as a function of pH. **Foods**, Basel, v. 8, n. 5, p. 2-11, May 2019.
- CARVALHO, C. W. P.; ONWULATA, C. I.; TOMASULA, P. M. Rheological properties of starch and whey protein isolate gels. **Food Science and Technology International**, London, v. 13, n. 3, p. 207-216, 2007.
- CASTELO, L. *et al.* Análise centesimal e comparativa de suplementos de proteínas do soro do leite bovino: whey protein. **Revista Brasileira de Nutrição Esportiva**, São Paulo, v. 9, n. 51, p. 223-231, 2015.

CASTRO, R. J. S. de *et al.* Whey protein as a key component in food systems: physicochemical properties, production technologies and applications. **Food Structure**, Chicago, v. 14, p. 17-29, May 2017.

CHATZIPASCHALI, A. A.; STAMATIS, A. G. Biotechnological utilization with a focus on anaerobic treatment of cheese whey: current status and prospects. **Energies**, Paris, v. 5, n. 9, p. 3492-3525, 2012.

CHINMA, C. E.; ARIAHU, C. C.; ABU, J. O. Chemical composition, functional and pasting properties of cassava starch and soy protein concentrate blends. **Journal of Food Science and Technology**, Trivandrum, v. 50, n. 6, p. 1179-1185, 2013.

COMISSÃO NACIONAL DE NORMAS E PADRÕES PARA ALIMENTOS. **Aprova normas técnicas especiais relativas a alimentos e bebidas**. Brasília, DF: CNNPA, 1979.

CORNEJO-RAMÍREZ, Y. I. *et al.* The structural characteristics of starches and their functional properties. **CYTA - Journal of Food**, London, v. 16, n. 1, p. 1003-1017, 2018.

DÍAZ, A. *et al.* Technological properties of sour cassava starches: effect of fermentation and drying processes. **LWT - Food Science and Technology**, Trivandrum, v. 93, p. 116-123, Dec. 2018.

DULLIUS, A.; GOETTERT, M. I.; SOUZA, C. F. V. de. Whey protein hydrolysates as a source of bioactive peptides for functional foods: biotechnological facilitation of industrial scale-up. **Journal of Functional Foods**, New York, v. 42, p. 58-74, Dec. 2018.

FALADE, K. O.; IBANGA-BAMIJOKO, B.; AYETIGBO, O. E. Comparing properties of starch and flour of yellow-flesh cassava cultivars and effects of modifications on properties of their starch. **Journal of Food Measurement and Characterization**, London, v. 13, n. 4, p. 2581-2593, 2019.

FANARI, F. *et al.* Thermogravimetric analysis of different semolina doughs: effect of mixing time and gluten content. **Chemical Engineering Transactions**, Milano, v. 75, p. 343-348, June 2019.

FERNANDES, D. de S. *et al.* Harvest time optimization leads to the production of native cassava starches with different properties. **International Journal of Biological Macromolecules**, Guildford, v. 132, p. 710-721, July 2019.

FIREBAUGH, J. D.; DAUBERT, C. R. Emulsifying and foaming properties of a derivatized whey protein ingredient. **International Journal of Food Properties**, Philadelphia, v. 8, n. 2, p. 243-253, 2005.

GARCIA, M. C. *et al.* Structural characteristics and gelatinization properties of sour cassava starch. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, Oxford, v. 123, n. 2, p. 919-926, 2016.

GOMAND, S. V. *et al.* Structural properties and gelatinisation characteristics of potato and cassava starches and mutants thereof. **Food Hydrocolloids**, Oxford, v. 24, n. 4, p. 307-317, 2010.

GRUNDY, M. M. L. *et al.* Influence of oat components on lipid digestion using an in vitro model: impact of viscosity and depletion flocculation mechanism. **Food Hydrocolloids**, Oxford, v. 83, p. 253-264, May 2018.

GUO, B. *et al.* Soluble starch/whey protein isolate complex-stabilized high internal phase emulsion: interaction and stability. **Food Hydrocolloids**, Oxford, v. 111, p. 106377, May 2021.

HA, E.; ZEMEL, M. B. Functional properties of whey, whey components, and essential amino acids: mechanisms underlying health benefits for active people: review. **Journal of Nutritional Biochemistry**, Stoneham, v. 14, n. 5, p. 251-258, 2003.

HARAGUCHI, F. K.; ABREU, W. C. de; PAULA, H. de. Proteínas do soro do leite: composição, propriedades nutricionais, aplicações no esporte e benefícios para a saúde humana Whey. **Solid State Communications**, New York, v. 181, n. 4, p. 54-59, 2014.

HARTATI, R. N.; AJIE, F. T.; HARTATI, N. S. Variation of cassava genotypes based on physicochemical properties of starches and resistant starch content. **IOP Conference Series: earth and environmental science**, Philadelphia, v. 439, n. 1, p. 0-9, 2020.

HUDSON, H. M.; DAUBERT, C. R.; FOEGEDING, E. A. Rheological and physical properties of derivitized whey protein isolate powders. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Easton, v. 48, n. 8, p. 3112-3119, 2000.

HUMA, N. *et al.* Effect of different filtration membranes on composition of sweet and acid whey protein effect of different filtration membranes on composition of sweet and acid whey protein. **Pakistan Journal of Food Sciences**, Lahore, v. 25, n. 2, p. 79-85, Mar. 2015.

JI, Y.; SEETHARAMAN, K.; WHITE, P. J. Optimizing a small-scale corn-starch extraction method for use in the laboratory. **Cereal Chemistry**, Saint Paul, v. 81, n. 1, p. 55-58, 2004.

JOVANOVIC, S.; BARAC, M. B. Whey proteins-properties and possibility of application whey proteins-properties and possibility of application. **Mljekarstvo**, Zagreb, v. 55, n. 3, p. 215-233, July 2005.

KRITHIKA, P. L.; RATNAMALA, D. K. V. Modification of starch: a review of various techniques. **International Journal of Research and Analytical Reviews**, Ahmedabad, v. 6, n. 1, p. 32-45, Jan./Mar. 2019.

LAVOISIER, A.; AGUILERA, J. M. Effect of a whey protein network formed by cold gelation on starch digestibility. **Food Biophysics**, New York, v. 14, p. 214-224, 2019.

LEE, C. K. *et al.* Enzymatic synthesis and properties of highly branched rice starch amylose and amylopectin cluster. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Washington, DC, v. 56, n. 1, p. 126-131, Jan. 2008.

LI, C. *et al.* Adlay starch- gluten composite gel: effects of adlay starch on rheological and structural properties of gluten gel to molecular and physico-chemical characteristics. **Food Chemistry**, London, v. 289, p. 121-129, Mar. 2019.

LIMA JUNIOR, F. A. *et al.* Response surface methodology for optimization of the mucilage extraction process from *Pereskia aculeata* Miller. **Food Hydrocolloids**, Oxford, v. 33, n. 1, p. 38-47, 2013.

MACHADO, C. M. **Alternativas para a redução da hidrofiliabilidade de espumas à base de amido**: adição de película de amendoim, modificação química e aplicação de revestimento. 2020. 187 p. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020.

MANSO, M. A.; LÓPEZ-FANDIÑO, R. K-Casein macropeptides from cheese whey: physicochemical, biological, nutritional, and technological features for possible uses. **Food Reviews International**, New York, v. 20, n. 4, p. 329-355, 2004.

MARASCHIN, M.; REGINA, E. Expansion properties of sour cassava starch (*Polvilho Azedo*): variables related to its practical application in Bakery. **Starch**, Weinheim, v. 61, n. 12, p. 716-726, Dec. 2009.

MARTINS, R. L.; VEIGA-SANTOS, P.; CASTILHO, S. G. **Fermentação divertida**: introdução à ciência através de atividade culinária investigativa. Botucatu: Ed. Unesp, 2014.

MASOTTI, F. *et al.* Technological tools to include whey proteins in cheese: current status and perspectives. **Trends in Food Science and Technology**, Cambridge, v. 64, p. 102-114, 2017.

NAWAZ, H.; WAHEED, R.; NAWAZ, M. Physical and chemical modifications in starch structure and reactivity. *In*: EMEJE, M. (ed.). **Chemical Properties of Starch**. Budapest: IntechOpen, 1-21, 2020.

NIELSEN, E. V. A method for determination of the degree of gelatinization of starch I. **Potato Research**, Basel, v. 12, n. 47, p. 116-121, 1969.

OLIVEIRA, D. C. de. **Efeito da secagem solar e em estufa convectiva sobre as características físico-químicas e reológicas do polvilho azedo**. 2016. 336 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

PALANISAMY, C. P. *et al.* A comprehensive review on corn starch-based. **Polymers**, Basel, v. 12, n. 9, p. 2161, 2020

PAPADEMAS, P.; KOTSAKI, P. Technological utilization of whey towards sustainable exploitation. **Advances in Dairy Research**, Brussels, v. 7, n. 4, p. 1-10, 2020.

PARADA, J.; SANTOS, J. L. Interactions between Starch, Lipids, and Proteins in Foods: microstructure control for glycemic response modulation. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, Cleveland, v. 56, n. 14, p. 2362-2369, 2016.

PARKER, R.; RING, S. G. Aspects of the physical chemistry of starch. **Journal of Cereal Science**, London, v. 34, n. 1, p. 1-17, 2001.

PELEGRINE, D. H. G.; GASPARETTO, C. A. Whey proteins solubility as function of temperature and pH. **LWT - Food Science and Technology**, Trivandrum, v. 38, n. 1, p. 77-80, 2005.

PENIDO, F. C. L. **Isolamento e identificação molecular da microbiota predominante na fermentação natural de mandioca**: seleção de culturas iniciadoras para produção de polvilho azedo em escala piloto. 2013. 101 p. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Alimentos) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

PEREIRA, A. P. *et al.* Efeito do polvilho azedo e doce na elaboração de pães. *In*: CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 28., 2016, Pelotas. **Anais** [...]. Pelotas: Ed. UFPEL, 2016. p. 2-5.

PERRY, P. A.; DONALD, A. M. The effect of sugars on the gelatinisation of starch. **Carbohydrate Polymers**, Barking, v. 49, n. 2, p. 155-165, 2002.

REN, F. *et al.* Original article Rheological, thermal and microstructural properties of whey protein isolate-modified cassava starch mixed gels at different pH values. **International Journal of Food Science + Technology**, Oxford, v. 52, n. 11, p. 2445-2454, Nov. 2017.

REN, F.; WANG, S. Effect of modified tapioca starches on the gelling properties of whey protein isolate. **Food Hydrocolloids**, Oxford, v. 93, n. 29, p. 87-91, 2019.

RYAN, M. P.; WALSH, G. The biotechnological potential of whey. **Reviews in Environmental Science and Bio/Technology**, Cham, v. 15, n. 3, p. 479-498, 2016.

SARAH, C.; AMEL, A. **Valorisation du lactoserum issu de fabrication du fromage apate molle type camembert par la formulation d'une boisson lactee a base de jus de figue de barbarie**. 2017. 46 p. Dissertation (Master de la Sciences Alimentaire) - Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie, Université A. Mira, Bejaia, 2017.

SETIOWATI, A. D.; WIJAYA, W.; MEEREN, P. van der. Whey protein-polysaccharide conjugates obtained via dry heat treatment to improve the heat stability of whey protein stabilized emulsions. **Trends in Food Science and Technology**, Cambridge, v. 98, p. 150-161, Feb. 2020.

SINGH, A.; GEVEKE, D. J.; YADAV, M. P. Improvement of rheological, thermal and functional properties of tapioca starch by using gum arabic. **Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie**, London, v. 80, n. 2, p. 215-233, July 2016.

STEFFE, J. F. **Rheological methods in food process engineering**. 2<sup>nd</sup> ed. Michigan: Freeman, 1996.

TADROS, T. F. Emulsion formation, stability, and rheology. *In*: TADROS, T. F. (ed.). **Emulsion formation and stability**. London: Wiley, 2013. p. 4770-4773.

TAPPIBAN, P. *et al.* Effects of cassava variety and growth location on starch fine structure and physicochemical properties. **Food Hydrocolloids**, Oxford, v. 108, p. 106074, Feb. 2020a.

TAPPIBAN, P. *et al.* Gelatinization, pasting and retrogradation properties and molecular fine structure of starches from seven cassava cultivars. **International Journal of Biological Macromolecules**, Guildford, v. 150, p. 831-838, 2020b.

TÉLLEZ-MORALES, J. A. *et al.* Techno-functional properties of the starch-protein interaction during extrusion-cooking of a model system (corn starch and whey protein isolate). **LWT - Food Science and Technology**, Trivandrum, v. 132, Oct. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109789>.

TESTER, R. F.; KARKALAS, J.; QI, X. Starch: composition, fine structure and architecture. **Journal of Cereal Science**, London, v. 39, p. 151-165, 2004.

UNITED STATES. Food and Drug Administration. **Whey protein concentrate**. New Hampshire: FDA, 2013. Disponível em: [http://www.accessdata.fda.gov/scripts/cdrh/cfdocs/cfCFR/CFRSearch.cfm?fr=184.197 9c](http://www.accessdata.fda.gov/scripts/cdrh/cfdocs/cfCFR/CFRSearch.cfm?fr=184.197%9c). Acesso em: 10 mar. 2022.

UTHUMPORN, U.; ZAIDUL, I. S.; KARIM, A. A. Hydrolysis of granular starch at sub-gelatinization temperature using a mixture of amylolytic enzymes. **Food and Bioproducts Processing**, Rugby, v. 88, n. 1, p. 47-54, Mar. 2010.

VASILIADOU, E.; RAPHAELIDES, S. N.; PAPASTERGIADIS, E. Effect of heating time and temperature on partially gelatinized starch: fatty acid interactions. **LWT - Food Science and Technology**, Trivandrum, v. 60, p. 698-707, 2015.

WAGONER, T. B.; FOEGEDING, E. A. Whey protein-pectin soluble complexes for beverage applications. **Food Hydrocolloids**, Oxford, v. 63, p. 130-138, 2017.

WANG, Z. Foaming properties of whey protein isolate and  $\lambda$ -carrageenan mixed systems. **Journal of Food Science**, Champaign, v. 80, n. 8, p. N1893-1902, Aug. 2015.

WATERSCHOOT, J. *et al.* Production, structure, physicochemical and functional properties of maize, cassava, wheat, potato and rice starches. **Starch**, Weinheim, v. 67, n. 1/2, p. 14-29, 2015.

WHISTLER, R. L.; BYRD, J. D.; THORNBURG, W. L. Surface structure of starch granules. **Biochimica et Biophysica Acta**, Alberta, v. 18(C), p. 146-147, 1955.

XIE, F. *et al.* Starch gelatinization under shearless and shear conditions starch gelatinization under shearless and shear conditions. **International Journal of Food Engineering**, New York, v. 2, n. 5, 2006. DOI: 10.2202/1556-3758.1162.

YADAV, J. S. S. *et al.* Cheese whey: a potential resource to transform into bioprotein, functional/nutritional proteins and bioactive peptides. **Biotechnology Advances**, New York, v. 33, n. 6, p. 756-774, 2015.

YOO, S. H. **Structures, properties, and biogenesis of starch and cyanobacterial glycogen**. 2001. 172 p. Dissertation (Doctor of Philosophy) - Iowa State University, Ames, 2001.

YU, J. K.; MOON, Y. S. Corn starch: quality and quantity improvement for industrial uses. **Plants**, Basel, v. 11, n. 1, p. 1-9, Nov. 2021.

ZHANG, Z. *et al.* Properties of partially denatured whey protein products 2: Solution flow properties. **Food Hydrocolloids**, Oxford, v. 56, p. 218-226, 2016.

ZHU, F. Composition, structure, physicochemical properties, and modifications of cassava starch. **Carbohydrate Polymers**, Barking, v. 122, p. 456-480, 2015.

ZHU, F. Modifications of starch by electric field based techniques. **Trends in Food Science & Technology**, Cambridge, v. 75, p. 158-169, Mar. 2018. DOI: 10.1016/j.tifs.2018.03.011.