



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
CENTRO DE TECNOLOGIA – CTEC
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA**



WANDERSON DOS SANTOS CARNEIRO

ESTUDO DO PROCESSO DE AGLOMERAÇÃO DA CIANOBACTÉRIA *Spirulina platensis* EM LEITO FLUIDIZADO VISANDO APLICAÇÃO EM ÁREA ALIMENTÍCIA

Maceió
2023

WANDERSON DOS SANTOS CARNEIRO

ESTUDO DO PROCESSO DE AGLOMERAÇÃO DA CIANOBACTÉRIA *Spirulina platensis* EM LEITO FLUIDIZADO VISANDO APLICAÇÃO EM ÁREA ALIMENTÍCIA

Dissertação de mestrado apresentado ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Alagoas como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo de Farias Silva.

Co-orientadora: Prof.^a Dr.^a Kaciane Andreola.

Maceió
2023

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico
Bibliotecária: Taciana Sousa dos Santos – CRB-4 – 2062

C289e Carneiro, Wanderson dos Santos.
Estudo do processo de aglomeração da cianobactéria *Spirulina platensis* em leito fluidizado visando aplicação em área alimentícia / Wanderson dos Santos Carneiro. – 2023.
74 f. : il. color.

Orientador: Carlos Eduardo de Farias Silva.
Coorientadora: Kaciane Andreola.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. Maceió, 2023.

Bibliografia: f. 58-67.
Apêndice: f. 68-74.

1. *Spirulina platensis*. 2. Aglomeração. 3. Leito fluidizado. 4. Tecnologia de alimentos. I. Título.

CDU: 66.0

Wanderson dos Santos Carneiro

**ESTUDO DO PROCESSO DE AGLOMERAÇÃO
DA CIANOBACTÉRIA *Spirulina platensis* EM LEITO
FLUIDIZADO VISANDO APLICAÇÃO EM ÁREA ALIMENTÍCIA**

Dissertação apresentada à
Universidade Federal de Alagoas,
como requisito para a obtenção do
Título de Mestre em Engenharia
Química.

Aprovada em: Maceió, 31 de julho de 2023.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Carlos Eduardo de Farias Silva (Orientador - PPGEQ/UFAL)

Prof. Dr. Rodolfo Junqueira Brandão (PPGEQ/UFAL)

Prof^a. Dr^a. Ana Karla de Souza Abud (UFS)

"O valor das coisas não está no tempo que elas duram, mas na intensidade com que acontecem. Por isso, existem momentos inesquecíveis, coisas inexplicáveis e pessoas incomparáveis".
(Fernando Pessoa)

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família, em especial à minha mãe Anne Kelly e minha madrinha Ana Lúcia pela força e o incentivo de continuar.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Carlos Eduardo de Farias Silva, que com seriedade conduziu-me ao decorrer deste trabalho, dando todo o auxílio necessário e, sobretudo, por todo conhecimento compartilhado.

À Universidade Federal de Alagoas (UFAL), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química (PPGEQ) e ao Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia (CEUN-IMT) pela estrutura disponibilizada para a realização deste trabalho.

As professoras Dr.^a Kaciane Andreola e Dr.^a Luciane F. G. de Souza que estiveram me dando todo auxílio, suporte e tirando dúvidas em virtude deste trabalho.

Agradeço ao auxílio, conversas, carinhos e apoios na qual recebi no CEUN-IMT, em especial as técnicas Dani, Márcia, Marineuza, Edna e Sandra.

À CAPES, pelo auxílio financeiro dado.

Enfim, um obrigado a todos que estiveram presentes nessa jornada.

RESUMO

Diante do intenso aumento de pesquisas com perspectiva para o desenvolvimento de fontes alimentares que sejam convencionais e que consigam atender a demanda da população, a cianobactéria *Spirulina platensis* tem se destacado devido as suas propriedades nutricionais, sendo fonte de proteínas, vitaminas, minerais, pigmentos, entre outros. Entretanto, essa cianobactéria na forma de pó apresenta partículas finas, o que leva a propriedades físicas indesejáveis, tais como baixa dispersão em líquidos e escoamento ruim, além de perdas de finos na manipulação, limitando a sua utilização industrial. O processo de aglomeração em leito fluidizado é utilizado para aumentar o tamanho de partículas finas, melhorando as propriedades físicas. Dessa forma, o objetivo desse trabalho foi estudar o processo de aglomeração da cianobactéria *Spirulina platensis* em leito fluidizado, a fim de melhorar as propriedades físicas do pó, bem como avaliar a qualidade do pó aglomerado. O estudo do processo foi realizado empregando-se um planejamento fatorial completo 2^2 com o intuito de identificar as possíveis melhorias em termos de processo, qualidade do produto e influência das variáveis operacionais. Os ensaios do planejamento foram realizados variando-se as condições operacionais de temperatura do ar de fluidização (65 - 85 °C) e vazão da solução ligante (1,5 - 3,5 mL/min), que foi uma solução de maltodextrina 30 % (m/m). As respostas avaliadas foram o rendimento do processo, a umidade, o tamanho médio das partículas (D_{50}), a fluidez, o tempo de molhamento e a atividade de água. Os experimentos revelaram um pó que mostrou crescimento das partículas, umidades abaixo de 15%, pós com escoamento caracterizado como razoável, melhoria no tempo de molhamento e atividade de água abaixo do valor de 0,65. Os pós também foram caracterizados quanto aos parâmetros de cor, obtendo diminuição nos parâmetros L^* e b^* e aumento no parâmetro a^* e por fim, caracterizados na composição centesimal. Os resultados revelaram que as melhores condições do processo foram obtidas utilizando a temperatura do ar de fluidização de 85 °C com vazão de atomização de ligante de 2,5 mL/min e temperatura do ar de fluidização de 75 °C com vazão de atomização de ligante de 2,0 mL/min, sendo possível nessas condições obter rendimentos acima de 50%, bem como um pó aglomerado com alto teor de proteínas com valores acima de 56%, baixo teor de umidade (5,46% para a condição com temperatura de 85°C e 6,51 - 7,4% para a

condição com temperatura de 75°C) que estão dentro do limite tolerável estabelecido pela ANVISA, boa fluidez, aumento no tamanho médio de partículas em 3,5 vezes (de 49,47 µm para 148,13 - 170,00 µm) e melhoria no tempo de molhamento (de 300 s para 3 - 150 s).

Palavras-chave: Fluidização; Aglomeração; *Spirulina platensis*; Tecnologia de alimentos.

ABSTRACT

In view of the intense increase in research with a perspective for the development of food sources that are conventional and that are able to meet the population's demand, the cyanobacterium *Spirulina platensis* has stood out due to its nutritional properties, being a source of proteins, vitamins, minerals, pigments, between others. However, this cyanobacteria in powder form has fine particles, which leads to undesirable physical properties, such as low dispersion in liquids and poor flow, in addition to losses of fines in handling, limiting its industrial use. The fluidized bed agglomeration process is used to increase the size of fine particles, improving physical properties. Thus, the objective of this work was to study the agglomeration process of the cyanobacteria *Spirulina platensis* in a fluidized bed, in order to improve the physical properties of the powder, as well as to evaluate the quality of the agglomerated powder. The process study was carried out using a 2² full factorial design in order to identify possible improvements in terms of process, product quality and influence of operational variables. The planning tests were carried out varying the operational conditions of fluidization air temperature (65 - 85 °C) and binder solution flow rate (1,5 – 3,5 mL/min), which was a maltodextrin solution 30 % (m/m). The experiments revealed were process yield, humidity, average particle size (D₅₀), fluidity, wetting time and water activity. The information studied revealed a powder that showed particle growth, moisture below 15%, powders with flow characterized as reasonable, improvement in wetting time and water activity below the value of 0,65. The powders were also characterized according to the color parameters, obtaining a decrease in the L* and b* parameters and an increase in the a* parameter and finally, characterized in the centesimal composition. The results revealed that the best process conditions were obtained using a fluidization air temperature of 85 °C with a binder atomization flow rate of 2,5 mL/min and a fluidization air temperature of 75 °C with an atomization flow rate of binder of 2,0 mL/min, making it possible under these conditions to obtain yields above 50%, as well as an agglomerated powder with high protein content with values above 56%, low moisture content (5,46% for the condition with temperature of 85°C and 6,51 - 7,4% for the condition with temperature of 75°C) which are within the tolerable limit established by ANVISA, good fluidity, increase in the average particle

size by 3,5 times (from 49,47 μm to 148,13 - 170,00 μm) and improvement in wetting time (from 300 s to 3 - 150 s).

Keywords: Fluidization; Agglomeration; *Spirulina platensis*; Food Technology.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Foto microscópica da <i>Spirulina platensis</i> .	16
Figura 2: Representação dos diferentes regimes de contato do leito fluidizado.	19
Figura 3: Diagrama de Geldart para classificação de partículas de acordo com seu comportamento de fluidização.	22
Figura 4: Esquema do processo de aglomeração.	24
Figura 5: Fluxograma geral das etapas desenvolvidas no trabalho.	27
Figura 6: Dispositivo de molhamento utilizado para os ensaios de tempo de instantaneização.	30
Figura 7: Equipamento utilizado para a realização do trabalho.	33
Figura 8: Curvas da distribuição de tamanho das partículas obtidas por difração a laser para a <i>Spirulina</i> (base volumétrica).	35
Figura 9: Comportamento fluidodinâmico da <i>Spirulina platensis</i> de acordo com o diagrama de Geldart.	36
Figura 10: Gráfico de Pareto para o rendimento (A), umidade (B) e atividade de água (C) do processo com $p < 0,1$.	42
Figura 11: Superfície de resposta para o rendimento do processo (A) e umidade (B).	44
Figura 12: Curvas da distribuição de tamanho das partículas obtidas por difração a laser para a <i>Spirulina</i> em todos os ensaios (base volumétrica).	46
Figura 13: Ensaio do tempo de instantaneização para a matéria-prima.	49
Figura 14: Ensaio do tempo de instantaneização para a matéria-prima com aglomeração.	52
Figura 15: Amostras de <i>Spirulina</i> sem e com aglomeração.	54
Figura 16: Ensaio do tempo de instantaneização para a matéria-prima com aglomeração na condição de $T = 65^{\circ}\text{C}$ e $Q = 1,5 \text{ mL/min}$ (Ensaio 1).	68
Figura 17: Ensaio do tempo de instantaneização para a matéria-prima com aglomeração na condição de $T = 85^{\circ}\text{C}$ e $Q = 1,5 \text{ mL/min}$ (Ensaio 2).	69
Figura 18: Ensaio do tempo de instantaneização para a matéria-prima com aglomeração na condição de $T = 65^{\circ}\text{C}$ e $Q = 2,5 \text{ mL/min}$ (Ensaio 3).	70
Figura 19: Ensaio do tempo de instantaneização para a matéria-prima com aglomeração na condição de $T = 85^{\circ}\text{C}$ e $Q = 2,5 \text{ mL/min}$ (Ensaio 4).	71
Figura 20: Ensaio do tempo de instantaneização para a matéria-prima com aglomeração na condição de (1) $T = 75^{\circ}\text{C}$ e $Q = 2,0 \text{ mL/min}$ (Ensaio 5).	72
Figura 21: Ensaio do tempo de instantaneização para a matéria-prima com aglomeração na condição de (2) $T = 75^{\circ}\text{C}$ e $Q = 2,0 \text{ mL/min}$ (Ensaio 6).	73
Figura 22: Ensaio do tempo de instantaneização para a matéria-prima com aglomeração na condição de (3) $T = 75^{\circ}\text{C}$ e $Q = 2,0 \text{ mL/min}$ (Ensaio 7).	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Quantidade de proteína bruta presente em alguns alimentos.	16
Tabela 2: Nível de fluidez de acordo com o índice de Hausner e o índice de Carr. ...	32
Tabela 3: Variáveis operacionais e níveis do planejamento fatorial.	34
Tabela 4: Condições operacionais fixadas nos ensaios.	34
Tabela 5: Matriz do planejamento fatorial completo 2 ² com as respostas obtidas em cada ensaio.	37
Tabela 6: Valores obtidos para a atividade de água (a _w) para aproximadamente 25 °C.	39
Tabela 7: ANOVA para o rendimento, umidade e atividade de água do produto.	43
Tabela 8: Tamanhos característicos da matéria-prima e pós aglomerados.	44
Tabela 9: Valores de I _{Carr} e I _H para a matéria-prima e para os produtos obtidos nas condições do planejamento experimental.	47
Tabela 10: Parâmetros de cor dos pós.	53
Tabela 11: Composição centesimal da <i>Spirulina</i>	55

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 OBJETIVOS	14
2.1 Objetivo geral	14
2.2 Objetivos específicos	14
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
3.1 A cianobactéria <i>Spirulina platensis</i> e aplicação na indústria de alimentos	15
3.1.1 Incorporação da <i>Spirulina</i> em alimentos	18
3.2 Fluidização	19
3.2.1 Classificação de Geldart para materiais particulados.....	21
3.3 Aglomeração de partículas.....	23
3.3.1 Variáveis que influenciam no processo de aglomeração de partículas de pós alimentícios	24
4 METODOLOGIA	27
4.1 Matéria-prima e agente ligante.....	28
4.2 Caracterização físico-química, reológica e de cor da <i>Spirulina in natura</i> e aglomerada	28
4.2.1 Proteína.....	28
4.2.2 Teor de lipídios totais	29
4.2.3 Teor de cinzas.....	29
4.2.4 Umidade	29
4.2.5 Carboidratos.....	29
4.2.6 Atividade de água.....	29
4.2.7 Tamanho e distribuição de tamanho das partículas	30
4.2.8 Tempo de instantaneização	30
4.2.9 Densidade real	31
4.2.10 Fluidez.....	31
4.2.11 Cor.....	32
4.3 Rendimento do processo.....	32
4.4 Sistema experimental	33
4.5 Ensaio preliminares	33
4.6 Planejamento dos ensaios experimentais	34

4.7 Teste de Tukey.....	34
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	35
5.1 Caracterização física da <i>Spirulina</i> e da solução ligante	35
5.2 Análise do rendimento obtido, umidade e atividade de água para o pó de <i>Spirulina</i> aglomerado.	37
5.3 Distribuição de tamanho das partículas	44
5.4 Fluidez e tempo de molhamento	47
5.5 Análise dos parâmetros de cor.....	53
5.6 Avaliação da melhor condição do processo	54
6 CONCLUSÃO	57
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	58
APÊNDICE A	68

1 INTRODUÇÃO

Com a crescente busca de alimentos que proporcionam propriedades benéficas para a saúde humana, a cianobactéria *Spirulina platensis* tem sido alvo de diversos estudos por possuir um alto valor nutricional em sua composição, bem como ser rica em diversas vitaminas, minerais, pigmentos, entre outros (ASHBY e HOUMARD, 2006; ABD EL BAKY et al., 2015; ABD EL BAKY et al., 2020). Além disso, essa cianobactéria na forma de pó apresenta partículas finas, o que leva a propriedades físicas indesejáveis, tais como baixa dispersão em líquidos e escoamento ruim, além de perdas de finos na manipulação, limitando a sua utilização industrial.

O cultivo da cianobactéria *Spirulina platensis* mostra ser um atrativo positivo devido sua duplicação da biomassa em poucos dias em condições favoráveis como temperatura, pH, luz, nutrientes e agitação (COSTA; MORAIS, 2011). Destaca-se que os cultivos podem ser realizados em sistemas abertos ou fechados, sendo possível relacionar variadas aplicações no mesmo processo, como fármacos, tratamento de águas residuais, biopolímeros, suplementos alimentares, entre outros (LIMA et al., 2022; UEBEL, 2017).

No seguimento industrial é possível encontrar o pó da *Spirulina* na produção de alimentos funcionais devido ao seu grande potencial enriquecedor. Alguns alimentos como iogurte (PATEL et al., 2019; BARKALLAH et al., 2017), biscoitos (GOLMAKANI et al., 2015), barras de cereais (LUCAS et al., 2017), pães (HAFSA et al., 2014), panquecas (KUMAR, 2017) e outros produtos alimentícios que podem ser encontrados com sua incorporação.

O processo de aglomeração de pós é comumente empregado em indústrias alimentícias, farmacêuticas e químicas no qual por meio do aumento do tamanho das partículas é possível melhorar as suas propriedades físicas, tais como fluidez, molhabilidade em líquidos, aparência, compactação e a redução de emissão de finos, sendo uma alternativa eficiente para o melhoramento da qualidade de pós (TURCHIULI et al., 2013; KNIGHT, 2001; FRÖHLICH et al., 2020)

Para o processo de aglomeração, os leitos fluidizados são amplamente utilizados por possibilitar a transferência de calor e de massa no sistema, nos quais ocorre a partir da atomização de uma solução ligante sobre as partículas, tornando-se assim um procedimento complexo devido a junção da umidificação, secagem e

mistura ao mesmo tempo (KUNII e LEVENSPIEL,1991; LITSTER e ENNIS, 2004; SINGH e TSOTSAS, 2019).

Sendo assim, esse trabalho teve como objetivo avaliar as modificações obtidas após o processo de aglomeração por umidificação em leite fluidizado, do pó da cianobactéria *Spirulina platensis*, com o intuito de identificar as possíveis melhorias em termos de qualidade do produto e influência das variáveis operacionais no desempenho do processo, visando uma possível aplicação em área alimentícia.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliar o processo de aglomeração por umidificação em leito fluidizado, da cianobactéria *Spirulina platensis*.

2.2 Objetivos específicos

- Caracterizar a matéria-prima por meio de análises de umidade, teor de proteínas, cinzas, teor de lipídios, tempo de instantaneização, fluidez, tamanho médio das partículas e atividade de água;
- Estudar o processo de aglomeração utilizando como ligante a solução de maltodextrina 30% (m/m) por meio de planejamento experimental, a fim de identificar as variáveis operacionais que influenciam no rendimento do processo, umidade, tamanho médio das partículas, atividade de água e fluidez;
- Caracterizar o pó aglomerado por meio de análises de fluidez, tempo de molhamento, tamanho médio das partículas, umidade e cor, a fim de avaliar a qualidade do pó aglomerado;
- Caracterizar o produto aglomerado obtido nas melhores condições por meio de análises de composição centesimal.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo tem como escopo apresentar um levantamento bibliográfico que serviu como base para o presente trabalho, sendo descritas algumas definições referentes a matéria-prima utilizada, aspectos conceituais sobre a fluidização e por fim, sobre o processo de aglomeração de partículas.

3.1 A cianobactéria *Spirulina platensis* e aplicação na indústria de alimentos

As microalgas e cianobactérias, popularmente são chamadas em conjunto apenas de microalgas. No entanto, as microalgas são eucarióticas e as cianobactérias são procarióticas, pertencendo a reinos microbianos diferentes, Protista e Monera, respectivamente. Elas vêm ganhando espaço devido a necessidade de se adotar alternativas que não impactam negativamente o meio ambiente e devido à adoção de tecnologias e processos limpos. Sua diversidade e características fisiológicas múltiplas, se tornam um grupo potencial rico que pode ser utilizado em vários setores industriais, como suplemento alimentar (GALARZA et al., 2016; VIEIRA et al., 2020).

Para a produção das microalgas/cianobactérias não se requer terras aráveis, sendo apresentado uma taxa de crescimento elevado e biomassa dobrada no período entre dois a cinco dias sem a utilização de pesticidas, fungicidas e herbicidas (COSTA; MORAIS, 2011).

E dentre as espécies utilizadas, destaca-se em diversos estudos a *Spirulina platensis*, que é uma cianobactéria filamentosa verde-azulada microscópica, unicelular, fotossintética e que é composta por tricomas de 5-6 µm de largura e 20-200 µm de comprimento em forma de um espiral envolvida por uma bainha fina, cujas paredes transversais podem ser notadas via microscopia ótica Figura 1 (TOMASELLI, 1997; EL-SAYED e MOSTAFA, 2018).

Tal espécie possui uma grande importância nutricional de biomassa, tornando-se um alimento completo, e em sua composição pode-se encontrar proteínas (60-70%), carboidratos (20%), lipídios (8%), assim como vitaminas (vitamina A, na forma betacaroteno, vitamina C e vitaminas do grupo B, como B₁, B₂, B₃, B₆ e B₁₂, vitamina E), minerais (cálcio, fósforo, magnésio, ferro, zinco, cobre, cromo, sódio e manganês), pigmentos (ficocianina e carotenóides), compostos fenólicos (ASHBY e HOUMARD, 2006; CELEKLI et al., 2016; SHABANA et al., 2017; MARKOU et al., 2023).

Ao se comparar a *Spirulina* com outros alimentos que são considerados como fontes proteicas, percebe-se que a mesma apresenta um valor elevado de proteínas, como mostra a Tabela 1.

Tabela 1: Quantidade de proteína bruta presente em alguns alimentos.

Alimento	Proteína Bruta (%)
Spirulina em pó	65
Ovo de galinha	47
Levedura de cerveja	45
Carne de galinha	24
Leite em pó desnatado	37
Queijo	36
Bife	22
Peixe	22

Fonte: PERON, 2005.

Figura 1: Foto microscópica da *Spirulina platensis*.



Fonte: SMALL, 2011.

Historicamente, a presença desta cianobactéria já era empregada na alimentação dos povos astecas que habitavam no México na região do lago Texcoco e dos povos sul-africanos na região do lago Chad, na qual utilizavam a microalga para enriquecer suas dietas (HU, 2004). Ressalta-se que a *Spirulina* é legalizada como suplemento alimentar em vários lugares, entre eles, Europa, Japão e Estados Unidos através da FDA (*Food and Drug Administration*) e no Brasil, a ANVISA (Agência Nacional de Vigilância Sanitária) permite que a mesma seja comercializada desde que atenda aos requisitos estabelecidos segundo a Instrução Normativa - IN nº 102, de 15

de outubro de 2021, onde se encaixa na lista de constituintes autorizados para uso em suplementos alimentares, exceto para os suplementos alimentares indicados para lactentes (0 a 12 meses) ou crianças de primeira infância (1 a 3 anos) (PARRY NUTRACEUTICALS, 2012; ANVISA, 2021).

Hosseini et al. (2013) mostraram em seu artigo uma revisão geral da aplicação da *S. platensis* e seus produtos, dispondo a aplicação médica que pode ser administrada para auxiliar em seu tratamento. Denota-se também as propriedades antioxidantes, reológicas, estabilidade e anti-envelhecimento observadas nos alimentos incorporados a essa cianobactéria, revelando-se ser um ingrediente estável quando a cor desejável é verde. Sendo possível utilizá-lo na alimentação humana, incorporando bebidas, produtos de panificação, doces, sobremesas em gel, laticínios e confeitados entre outros alimentos.

Da mesma forma, a utilização dessa cianobactéria em alimentação animal tem sido exposta em diversos estudos como fonte de nutriente e fonte de compostos bioativos nas quais tem potencial de melhorar a resistência à doença animal, a resposta imune animal, ação antiviral e antibacteriana, entre outros. Neumann et al. (2018) realizou através de três experimentos consecutivos a investigação da inclusão de *Spirulina* em dietas de frango, sendo capazes de substituir integralmente o farelo de soja pela cianobactéria, considerando que as dietas foram atendidas e equilibradas com os requisitos de aminoácidos animais.

Segundo Ambrosi et al. (2008) na Europa, Estados Unidos e Japão, a *Spirulina* é legalmente permitida como complemento alimentar com ausência de efeitos tóxicos ao organismo e de adulteração com substâncias desde 1981. Já, no território brasileiro, a Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA) fala que os constituintes autorizados para uso na composição de suplementos alimentares restringem-se àqueles previstos nos Anexos I e II da IN nº 28/2018 e suas atualizações. Entretanto, como não existe nenhuma alegação de propriedade funcional autorizada especificamente para a *Spirulina*, um suplemento alimentar de *Spirulina* deverá atender obrigatoriamente o mínimo de 8,4 g de proteínas para adultos (BRASIL, 2022).

3.1.1 Incorporação da *Spirulina* em alimentos

Com a possibilidade de incorporação da biomassa de *Spirulina* em determinados alimentos torna-se como um grande potencial de inovação comercial e tecnológica devido a sua agregação em valor nutricional aos produtos. Nessa esfera, podemos encontrar diversas possibilidades que possam atender à crescente demanda dos consumidores por alimentos ditos como saudáveis, nutritivos e práticos.

Barkallah et al. (2017) incorporaram a biomassa da *Spirulina* no iogurte em quatro diferentes concentrações (0,25; 0,5; 0,75 e 1%), estudando-se seu efeito sobre o processo fermentativo, textura, nutracêutico e características sensoriais do iogurte. Neste estudo, a adição de 0,25% de *Spirulina* foi significativamente suficiente para acelerar o final da fermentação ($p < 0,05$) e conservar as propriedades texturais e a aceitabilidade sensorial do produto lácteo final. No geral, o estudo conclui que a *Spirulina* pode ser usada como um ingrediente natural para desenvolver um novo iogurte com altas propriedades nutricionais.

Snacks enriquecidos com *Spirulina* foram desenvolvidos com a finalidade de melhorar suas características nutricionais. Duas formulações foram desenvolvidas: 2,6% de *Spirulina* e com 0% *Spirulina*. A adição de *Spirulina* proporcionou aumento nutricional de 22,6% nas proteínas, 28,1% nos lipídios e 46,4% nos minerais, sem afetar significativamente ($p > 0,05$) os parâmetros físicos como índice de expansão e dureza. Os pigmentos dessas microalgas influenciaram significativamente ($p < 0,05$) os parâmetros de cor avaliados. Essa formulação resultou em um índice de aceitação sensorial de 82%. Além disso, os *snacks* apresentaram estabilidade física e microbiológica ao longo de 12 meses de armazenamento (LUCAS et al., 2018).

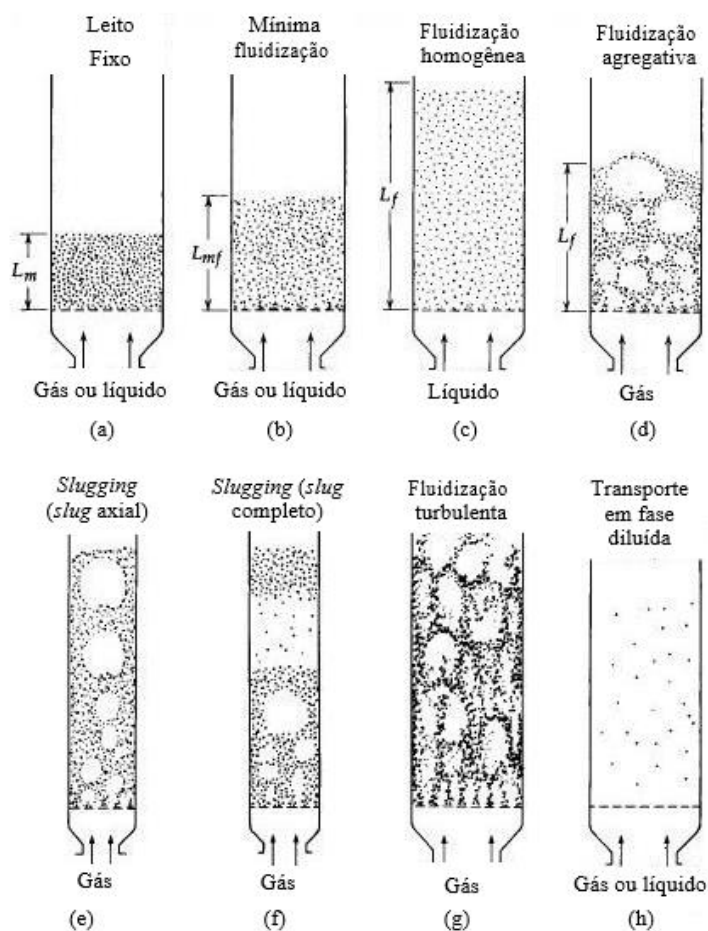
Oliveira et al. (2021) combinou a *Spirulina* com o leite de chocolate. Foram utilizadas três formulações de *Spirulina* (0%, 5% e 8,75%). A incorporação resultou no aumento no teor de proteína e redução de lipídios totais. Todas as amostras analisadas mostraram boa estabilidade da suspensão e baixa higroscopicidade (<10%). Sensorialmente, as três formulações mantiveram a mesma média para o parâmetro de consistência, e uma impressão global que não foi rejeitada pelos provadores.

3.2 Fluidização

Entende-se por fluidização, a operação na qual descreve o fenômeno em que as partículas sólidas são movimentadas em suspensão devido ao escoamento de um fluido, que pode ser líquido ou gás (KUNII e LEVENSPIEL, 1991; HORIO, 2017). Os equipamentos que são utilizados para a fluidização apresentam altas taxas de transferência de calor e de massa entre o gás e o material fluidizado, sendo possível encontrar esse processo em diversas indústrias químicas, farmacêuticas, petroquímicas e de alimentos (BURGGRAEVE et al., 2013; VOGT; WECKHUYSSEN, 2015).

Existem diferentes regimes de fluidização que dependem da velocidade do gás de entrada e da movimentação do sólido no interior do leito, sendo ilustrados na Figura 2.

Figura 2: Representação dos diferentes regimes de contato do leito fluidizado.



Fonte: Adaptado de KUNII e LEVENSPIEL, 1991.

O regime apresentado na Figura 2 (a), do tipo leito fixo, ocorre quando um fluido escoar em baixa velocidade pelo leito de partículas, percolando os espaços vazios entre as partículas, de modo a permanecerem em estado estacionário. Com um acréscimo da velocidade do fluido haverá, conseqüentemente, um afastamento das partículas, que começam a se movimentar em regiões restritas caracterizando o regime de leito expandido. Se a velocidade do fluido for aumentada ainda mais, haverá um equilíbrio entre a força de arraste do fluido e o peso das partículas, e a queda de pressão no leito passará a ser constante. As partículas são suspensas pelo escoamento ascendente do fluido. Tal regime refere-se à leito de fluidização incipiente ou mínima fluidização (Figura 2 (b)). Na fluidização de sistemas sólido-líquido um aumento da velocidade do fluido acima da velocidade de mínima fluidização resultará em uma expansão gradual do leito, com pequenos espaços vazios (borbulhamentos), caracterizando uma fluidização do tipo homogêneo (Figura 2 (c)). Já em sistemas sólido-gás, o aumento da velocidade do fluido acima da velocidade mínima de fluidização, resultará em um borbulhamento mais intenso, havendo aparecimento de canais, regime denominado fluidização agressiva, heterogênea ou borbulhante (Figura 2 (d)). Ainda, dependendo da geometria da coluna e em elevadas velocidades de fluidização em sistemas sólido-gás, acontecerá um regime de fluidização do tipo *slugging*, no qual as bolhas de gás coalescem e crescem à medida que sobem. A Figura 2 (e) ilustra o *slug* axial, na qual as partículas sólidas são finas e deslizam de forma suave por volta das elevações das bolhas grandes e a Figura 2 (f) representa os *slugs* flutuantes, na qual as partículas são maiores e a porção de sólidos acima da bolha é empurrada caindo para o *slug* de baixo à medida em que vai subindo criando um movimento oscilatório e contínuo. Ao atingir uma velocidade maior que a velocidade terminal da partícula, o leito é dito como turbulento. O regime de fluidização turbulento, Figura 2 (g), ocorre quando as partículas são fluidizadas com uma velocidade de gás suficientemente alta, de modo que a velocidade terminal dos sólidos é excedida e o material passa a ser arrastado. Esse regime é caracterizado pelo desaparecimento da superfície superior do leito e ao invés de bolhas, tem-se um movimento turbulento de sólidos com espaços vazios preenchidos com gás. Com velocidades de fluido ainda maiores, os sólidos são totalmente arrastados, caracterizando um transporte em fase diluída, como observa-se na Figura 2 (h) (KUNII e LEVENSPIEL, 1991; HORIO, 2017).

De modo geral, leitos fluidizados podem ser utilizados para a realização de diversos processos industriais, como recobrimento de partículas, gaseificação de carvão e secagem. Usualmente, apresenta uma série de vantagens e desvantagens, como mostra o Quadro 1.

Quadro 1: Vantagens e desvantagens da fluidização em operações industriais.

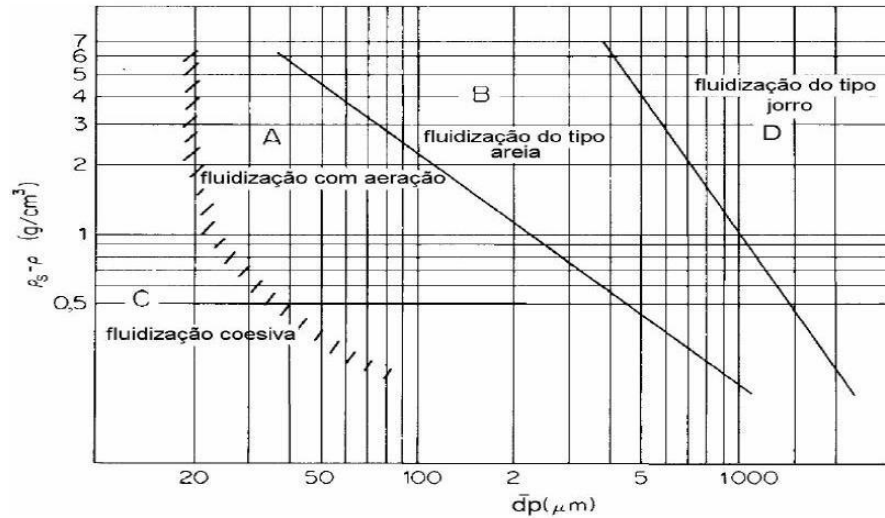
Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> • Altas taxas de transferência de calor e de massa entre o gás e o material fluidizado; • Podem ser utilizados em operações de larga escala; • A mistura rápida dos sólidos leva a ter condições muito próximas a de um reator isotérmico, tornando a operação simples e fácil; • Devido a mistura intensa, evita mudanças bruscas de temperatura, auxiliando assim, o controle de uma reação química exotérmica. 	<ul style="list-style-type: none"> • Perda de material particulado devido as quebras dos sólidos ao longo do processo, mudando as características fluidodinâmicas; • Erosão dos componentes devido à alta abrasão entre as partículas sólidas; • Tempo de residência não uniforme devido a intensa mistura das partículas, principalmente em reações de alta conversão.

Fonte: Kunii e Levenspiel (1991) e Litster e Ennis (2004).

3.2.1 Classificação de Geldart para materiais particulados

Devido à grande variedade de materiais particulados existentes, Geldart (1973) classificou os sólidos em quatro grupos, de acordo com a maneira que se comportam durante a fluidização, como mostra a Figura 3 e descritas a seguir.

Figura 3: Diagrama de Geldart para classificação de partículas de acordo com seu comportamento de fluidização.



Fonte: Adaptado de GELDART, 1973.

Grupo A (aeráveis): Representam de modo geral por partículas de diâmetros médio pequeno e/ou densidade menor ou igual a 1,4 g/cm^3 . Tais sólidos apresentam expansão considerável e homogênea no leito após a velocidade de mínima fluidização e antes que aconteça o aparecimento das bolhas. Sua dinâmica de movimento é caracterizada pela presença de pequenas bolhas de gás que produzem rápida mistura assemelhando-se a um líquido em ebulição. Como exemplo desse grupo, tem-se o FCC (*Fluidized Catalytic Cracking*) que é muito utilizado no processo de craqueamento catalítico do petróleo.

Grupo B (areia): As partículas desse grupo abrangem diâmetros médios entre 40 μm e 500 μm e densidade entre 1,4 g/cm^3 e 4,0 g/cm^3 . Observa-se neste grupo que o movimento da fluidização é caracterizado pelo aparecimento de bolhas logo após a velocidade superficial do fluido exceder a velocidade de mínima fluidização. Além disso, o leito se expande pouco e possui uma mistura quase inexistente na ausência das bolhas. Um exemplo de sólido típico deste grupo é a areia.

Grupo C (coesivo): Sólidos muito finos e coesivos com baixa densidade e tamanho médio de partículas menores que 30 μm . Possui uma difícil fluidização devido ao fato das forças interpartículas serem maiores que as forças resultantes da ação do gás. Para uma melhor qualidade de fluidização, torna-se necessário o uso de agitadores

mecânicos ou vibração para evitar caminhos preferenciais que aparecem com bastante facilidade em leitos de grande diâmetro. Alguns exemplos deste grupo são: farinhas, cimentos, amido, entre outros.

Grupo D (jorro): Composto por partículas grande e densas. Possui uma fluidização muito difícil devido a uma baixa expansão e mistura do leito. Para produzir um melhor contato dessas partículas, usa-se o leito de jorro, na qual são constituídos por um cilindro e uma base tronco-cônica. Encontra-se neste grupo os grãos de soja, feijões, café, ervilha, entre outros.

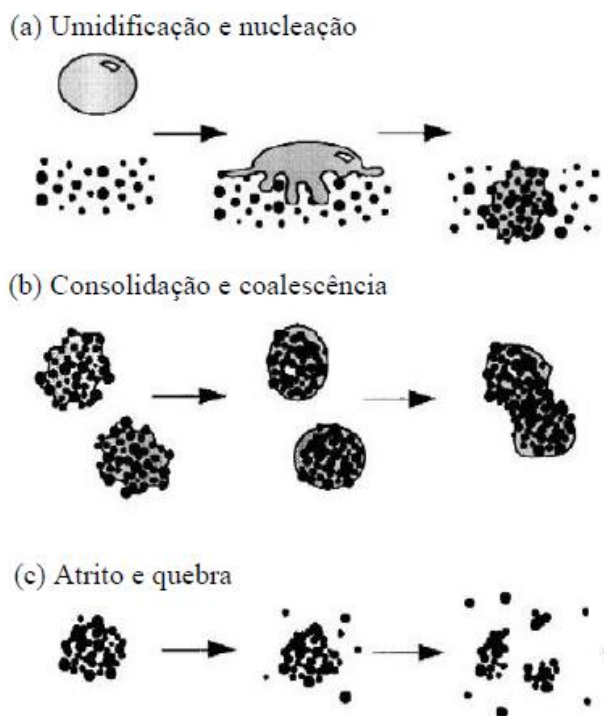
3.3 Aglomeração de partículas

O processo de aglomeração consiste em uma operação que permite transformar um produto particulado fino em agregados de partículas, denominados grânulos, modificando a sua estrutura física. Este processo pode ser realizado por duas vias: a via úmida que utiliza um agente ligante sobre as partículas sólidas ou por via seca que ocorre utilizando-se altas pressões (BERNARDES, 2006; AVILÉS-AVILÉS et al., 2015; HAIDER et al., 2018).

No geral, o processo de aglomeração proporciona melhores propriedades de instantaneização devido ao aumento do tamanho das partículas e da sua porosidade, permitindo uma rápida penetração de líquido no seu interior, por capilaridade. Em pós não aglomerados, como o volume de ar é pequeno, a quantidade de água será pequena, o que resulta em uma solução concentrada de alta viscosidade na superfície do pó. Mas, quando o volume de ar é grande (o que ocorre nos pós aglomerados), a quantidade de água de dissolução será grande, facilitando assim a dispersão dos grânulos, antes da formação de soluções de alta viscosidade (SCHUBERT, 1987; HOGEKAMP e SCHUBERT, 2003; VISSOTTO et al., 2006). A aglomeração também resulta na obtenção de produtos com melhores propriedades de fluidez, redução de finos e aparência (DACANAL, 2005; JINAPONG et al., 2008; TAKEITI, 2007; VISSOTTO, 2014; MONTES et al., 2010; DACANAL e MENEGALLI, 2010; MACHADO et al., 2014; ANDREOLA, 2017).

Segundo Iveson et al. (2001), o processo de aglomeração é descrito como uma combinação de três etapas, conforme apresentado na Figura 4.

Figura 4: Esquema do processo de aglomeração.



Fonte: Adaptado de IVESON et al., 2001.

A primeira etapa, Figura 4 (a), é caracterizada quando o líquido ligante umidifica as partículas secas, dando início a formação dos grânulos.

Na segunda etapa, ilustrada na Figura 4 (b), é o momento na qual as colisões entre dois grânulos, grânulos e pó, ou grânulos e as paredes do equipamento levam a coalescência e consolidação dos grânulos, proporcionando o seu crescimento.

Por fim, a última etapa (Figura 4 (c)) é a fase na qual os grânulos úmidos ou secos podem ser quebrados por impacto, desgaste ou compactação no equipamento ou até mesmo no manuseio posterior do produto (IVESON et al., 2001; KOTMARTHY e RAMACHANDRAN, 2021).

3.3.1 Variáveis que influenciam no processo de aglomeração de partículas de pós alimentícios

O processo de aglomeração em leito fluidizado tem sido reportado na literatura por ser um processo eficiente para a melhoria da qualidade de pós alimentícios, proporcionando melhorias nas propriedades de instantaneização com o aumento das

partículas e sua porosidade, bem como aumento da fluidez (DACANAL, 2010; DACANAL, 2013; MACHADO et al., 2014; ANDREOLA, 2017).

Os sistemas de aglomeração são considerados inerentemente de natureza complexa devido a gama de variáveis que podem influenciar no resultado do processo e do produto final obtido. Tais variáveis podem estar relacionadas ao equipamento (distribuição do ar, geometria do leito, tipo de atomização, posição do bico atomizador no leito, presença de dispositivo para pulsação ou vibração do leito) ou podem ser parâmetros do processo (vazão de fluidização do gás, temperatura e umidade, vazão do ligante e pressão de atomização) (VIEGAS, 2017; LIU et al., 2013).

Dacanal (2005) realizou o estudo da granulação de suco de acerola concentrado desidratado em leito fluidizado, utilizando água como ligante, avaliando as principais variáveis que poderiam influenciar o processo de granulação: temperatura do ar (variando de 75 - 90 °C), velocidade do ar de fluidização (variando de 0,25 - 0,45 m/s), vazão de ar no bico aspersor (variando de 8,5 - 11,5 cm³/min a 27 °C e 101,325 kPa) e posição do bico no leito (variando de 50 - 70 cm em relação à placa distribuidora de ar do leito). O autor reportou, que o crescimento de partículas ocorre devido ao aumento da umidade no interior do leito e conseqüente acréscimo do teor de umidade do produto. O pó aglomerado obtido apresentou melhores propriedades de instantaneização na quais chegam a ser 5 vezes menor que o tempo de instantaneização da matéria-prima e decréscimo da fração de material não-solubilizado.

A proteína isolada de soja foi aglomerada utilizando soluções aquosas de maltodextrina, a 27 °C como ligante. Foram realizados quatro experimentos a fim de avaliar os efeitos da concentração (0;10;25 e 40%) e vazão do líquido ligante (1,7 g/min; 1,9 g/min; 2,3 g/min e 3,0 g/min). Os resultados mostraram que o pó aglomerado apresentou melhorias nas propriedades de instantaneização e fluidez, comparados com a matéria-prima (DACANAL, 2009).

Nascimento (2017) utilizou uma solução de goma arábica (15 % m/m) e água destilada para aglomeração da proteína isolada de ervilha, na qual dois planejamentos fatoriais completos 2² foram usados para estudar os efeitos da temperatura do ar de fluidização (65 - 85 °C) e a vazão do ligante (2,4 - 3,8 mL/min). O pó aglomerado teve um aumento de aproximadamente 5 a 8 vezes no diâmetro médio das partículas, bem

como melhorou propriedades de instantaneização e fluidez, sendo superiores às apresentadas pela proteína isolada de ervilha comercial.

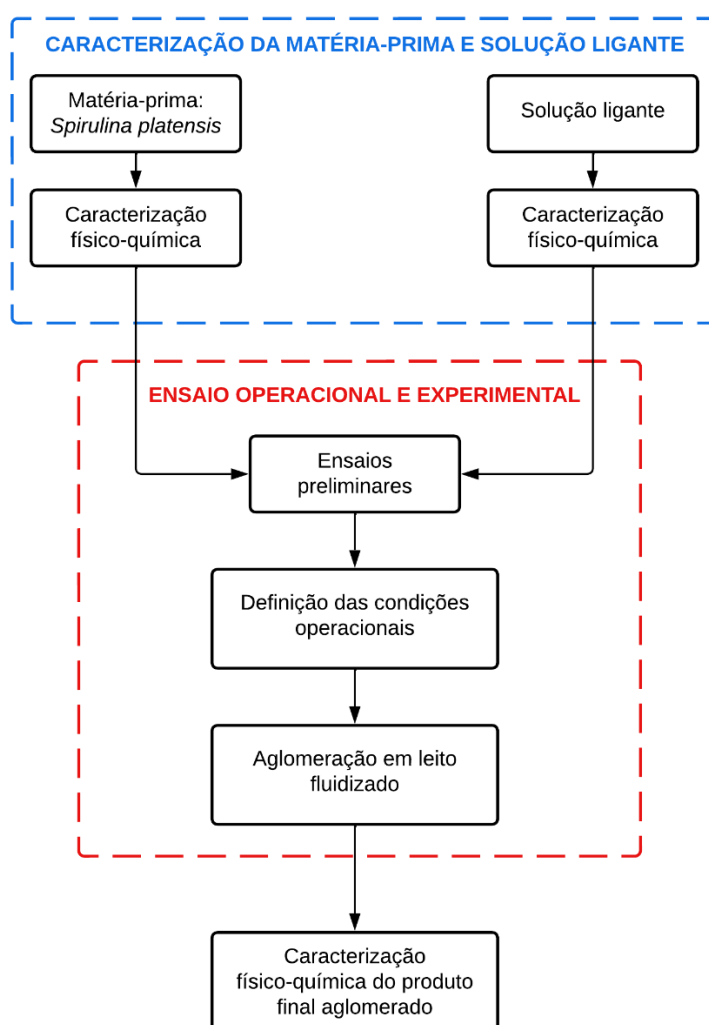
Andreola (2017) estudou a aglomeração de proteína concentrada de arroz utilizando como solução ligante a polpa de uva onde as variáveis independentes estudadas foram a temperatura do ar (65 - 85 °C) e a vazão de atomização do ligante (1,5 - 2,5 mL/min) e soluções aquosas de alginato de sódio usando as mesmas variáveis e também a concentração de ligante (1,0 - 2,0%), através do monitoramento *in-line* do tamanho de partículas. A autora obteve um produto proteico com baixa umidade, alto teor de proteínas e com melhores propriedades de instantaneização e fluidez, em relação à matéria-prima. Nessas condições, foram obtidos rendimentos acima de 70% com um aumento no tamanho médio final das partículas de cerca de 5 vezes e quando a polpa de uva foi utilizada, além de verificar a incorporação de antocianinas no produto final (11,79 mg/100g).

Ressalta-se que estudos visando o processo de aglomeração em leite fluidizado de microalgas e/ou cianobactérias não foram encontrados na literatura.

4 METODOLOGIA

Nesta seção, serão descritos os materiais e métodos que foram utilizados para a realização dos experimentos descritos neste trabalho. A metodologia empregada para o desenvolvimento e obtenção dos resultados teve as etapas apresentadas em forma de fluxograma na Figura 5, sendo sequencialmente realizada a caracterização físico-química da *Spirulina* e do agente ligante, realização de ensaios preliminares de aglomeração, para definição das condições operacionais a serem executadas nos ensaios matriz do planejamento experimental. Por fim, foi realizada a caracterização das propriedades físicas e químicas dos pós aglomerados.

Figura 5: Fluxograma geral das etapas desenvolvidas no trabalho.



Fonte: Autor, 2023.

4.1 Matéria-prima e agente ligante

A matéria-prima utilizada nos ensaios de aglomeração foi a *Spirulina* em pó, adquirida da empresa Saúde In Natura Alimentos Funcionais®.

Nos ensaios de aglomeração foi utilizado como agente ligante uma solução aquosa de maltodextrina (MOR-REX® 1910, Ingredion, Brasil). Esse ligante foi escolhido para a aglomeração devido a sua grande utilização como solução ligante em processos de aglomeração de pós (TURCHIULI et al., 2005; JINAPONG et al., 2008; DA CUNHA et al., 2009; DACANAL e MENEGALLI, 2010; ANDREOLA, 2017).

Para preparação do ligante foi utilizado uma concentração de 30% (m/m) de maltodextrina. O preparo dessa solução consistiu da completa dissolução do pó de maltodextrina em água destilada à temperatura ambiente (25 ± 2 °C) sob forte agitação mecânica até completa solubilização. A densidade da solução ligante foi determinada por picnometria, utilizando um picnômetro de vidro de 50 mL previamente calibrado com água segundo a Norma Analítica nº 011/IV do Instituto Adolfo Lutz (2008). A densidade obtida pela relação entre a massa de amostra e o volume do picnômetro.

4.2 Caracterização físico-química, reológica e de cor da *Spirulina in natura* e aglomerada

4.2.1 Proteína

Para a determinação da proteína bruta foi utilizado o método Kjeldahl, usando como catalisador de mineral 96% de sulfato de potássio e 4% de sulfato de cobre, com ácido bórico 2% como solução receptora na destilação de amônia. Com seguinte, a amostra foi titulada com ácido clorídrico 0,02 mol/L.

No que se refere ao teor de proteínas da *Spirulina*, utilizou-se um valor de 6,25 para o fator de correção na qual foi determinado com base no teor de nitrogênio total pelo método de Kjeldahl (AOAC, 1995). Pode-se encontrar tal valor utilizado no fator de correção em diversos estudos reportados na literatura (MATSUDO, 2006; BARROS, 2010; FERNANDES, 2015; OLIVEIRA et al., 2021).

4.2.2 Teor de lipídios totais

O teor de lipídios totais foi determinado pelo método descrito por Bligh e Dryer (1959) e quantificados por gravimetria. Para este método, foi utilizado 90 mg de amostra.

4.2.3 Teor de cinzas

Para a determinação do teor de cinzas as amostras foram identificadas, pesadas e colocadas para incineração e mufla a 500 °C. O procedimento consistiu em queimar toda a matéria orgânica contida nas amostras até o ponto de cinzas. A determinação quantitativa das cinzas totais foi realizada pelo método de resíduo por incineração de acordo com as Normas Analíticas do Instituto Adolf Lutz (2008).

4.2.4 Umidade

Inicialmente a umidade da matéria-prima e dos pós aglomerados foram determinadas por meio de secagem direta em estufa a 105 °C, método nº 012/IV segundo Instituto Adolfo Lutz (2008) e em paralelo com um analisador de umidade (Shimadzu, MOC63u).

O analisador de umidade possui uma biblioteca nas quais dispõem algumas orientações, sendo escolhido o programa referente a amostra de manga seca, na qual consiste em usar 5 g da amostra, temperatura de 120 °C e 0,05 % para finalização.

4.2.5 Carboidratos

A quantidade de carboidratos foi determinada por diferença considerando apenas os valores de proteínas, lipídios, cinzas e umidade (b.u.).

4.2.6 Atividade de água

A atividade de água foi determinada por meio de leitura direta em higrômetro AQUAlab, 4TE de Decagon, a 25 °C.

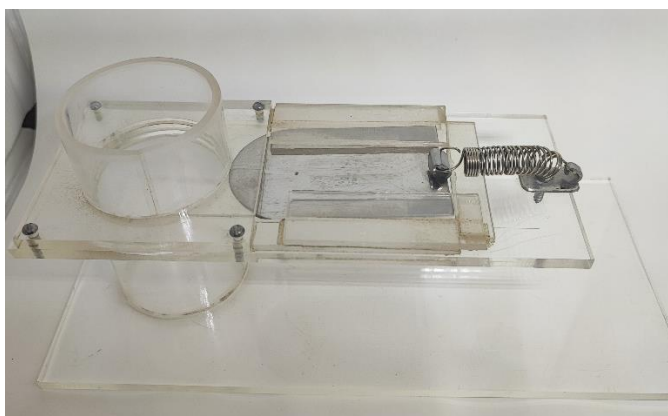
4.2.7 Tamanho e distribuição de tamanho das partículas

As medidas de tamanho e distribuição de tamanho das partículas dos pós de *Spirulina* foram realizadas com o auxílio de um analisador de tamanho de partículas a laser (Bettersizer 2600, Bettersize Instruments LTD, China). A operação consistiu em mediações a seco, usando o módulo de dispersão automático BT-902 e a aproximação de Fraunhofer para obtenção das informações. A faixa de medição do equipamento abrange de 0,02 μm a 2600 μm e os percentis de diâmetro de partícula representam o diâmetro da esfera equivalente (do mesmo volume) abaixo do qual estão 90 %, 50 % e 10 % das partículas.

4.2.8 Tempo de instantaneização

O tempo de instantaneização ou tempo de molhamento foi determinado por meio de um dispositivo semelhante ao utilizado por Hoge Kamp e Schubert (2003) e por Dacanal (2005), ilustrado na Figura 6.

Figura 6: Dispositivo de molhamento utilizado para os ensaios de tempo de instantaneização.



Fonte: Autor, 2023.

Para a realização desse teste, o reservatório foi preenchido com 100 mL de água destilada a 23 ± 2 °C, na qual foi tampado com uma lâmina presa por um pino. Em seguida, distribuído uniformemente 1 g de amostra sobre a lâmina. Ao posicionar uma câmera para filmar todo processo, o pino é solto fazendo com que a lâmina se desloque e o pó entre em contato com a água. O teste foi finalizado após 5 minutos do processo. Por fim, o tempo de instantaneização foi determinado por meio do processamento de vídeo.

4.2.9 Densidade real

A densidade real dos pós foi avaliada por picnometria a gás, com o auxílio de um picnômetro a gás de nitrogênio (AD210, ACP Instruments LTD, Brasil).

4.2.10 Fluidez

Uma estimativa deste parâmetro pode ser obtida por meio de correlações, tais como o índice de Hausner (I_H) e o índice de compressibilidade de Carr (I_{Carr}) (TURCHIULI et al., 2005; JONG et al., 1999; GELDART et al., 1984). Esses índices relacionam a densidade do leito de partículas (ρ_b - densidade aparente aerada) e densidade do leito de partículas compactado (ρ_t - densidade aparente compactada).

Para a determinação da densidade do leito, um volume de aproximadamente 10 g de partículas foi colocado em uma proveta de 100 mL. Em seguida, a proveta foi pesada em uma balança analítica para obter a massa das partículas, sendo conhecida a massa da proveta vazia. A densidade do leito foi calculada pela razão entre a massa e o volume das partículas ($\rho_b = m_{partículas}/V_{partículas}$). Para determinação da densidade do leito compactado, a mesma proveta utilizada para obtenção da densidade do leito, incluindo o seu conteúdo, foi colocada em agitação no equipamento *Autotap* (*Tap Density Analyzer*, TAP-2SP, Logan Instrument Co. Ltd.®, Zhenjiang, China). Foi utilizado um número padronizado de 1250 batidas para a compactação da amostra de acordo com a European Pharmacopoeia (2010). A densidade do leito compactado foi obtida pela razão entre a massa, que foi a mesma utilizada anteriormente, pelo volume final medido na proveta após a compactação.

A fluidez pode ser calculada através das equações apresentadas abaixo. Para o índice de Hausner (I_H) (HAUSNER, 1967) é apresentado através da Equação 1 e para o índice de compressibilidade de Carr (I_{Carr}) (CARR, 1965) é apresentado através da Equação 2.

$$I_H = \frac{\rho_t}{\rho_b} \quad (1)$$

$$I_{Carr} = \frac{\rho_t - \rho_b}{\rho_t} \quad (2)$$

A Tabela 2 apresenta o nível de fluidez de acordo com o índice de Hausner (I_H) e o índice de compressibilidade de Carr (I_{Carr}), respectivamente.

Tabela 2: Nível de fluidez de acordo com o índice de Hausner e o índice de Carr.

Fluidez do pó	Índice de Hausner	Índice de Carr
Excelente	1,00 a 1,11	≤ 10
Boa	1,12 a 1,18	11 a 15
Razoável	1,19 a 1,25	16 a 20
Tolerável	1,26 a 1,34	21 a 25
Ruim	1,35 a 1,45	26 a 31
Muito ruim	1,45 a 1,59	32 a 37
Péssima	$> 1,6$	> 38

Fonte: Adaptado de USP 37, 2014.

4.2.11 Cor

Para a determinação da cor foi empregado o método CIE (*International Commission on Illumination*), na qual utilizou-se um colorímetro *Color Quest XE* (Hunter Lab Inc., Reston/VA, USA) obtendo-se a leitura dos parâmetros L^* que define a luminosidade ($L^* = 0$ – preto e $L^* = 100$ – branco) e a^* e b^* , que são responsáveis pela cromaticidade ($+a^* =$ vermelho e $-a^* =$ verde; $+b^* =$ amarelo e $-b^* =$ azul).

4.3 Rendimento do processo

O rendimento do processo (η) foi definido como a razão entre a massa de sólidos remanescente no leito ao final dos ensaios (m_f) e a massa de sólidos adicionada no leito (m_i), ambas em base seca. A massa de sólidos adicionada no leito (m_i) inclui a massa da *Spirulina* (base seca) e a massa de sólidos presente no ligante (maltodextrina). A massa de material elutriado (m_{elut}) e as perdas decorrentes da incrustação de produto na parede do leito (m_{inc}), ou pela formação de torrões ($m_{torrões}$), foram desconsideradas conforme mostrado na Equação 3.

$$\eta (\%) = \frac{m_f}{m_i} \times 100 = \frac{m_i - (m_{elut} + m_{inc} + m_{torrões})}{m_i} \times 100 \quad (3)$$

4.4 Sistema experimental

Os experimentos de aglomeração foram realizados em um leito fluidizado localizado no laboratório I-16, do Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia (CEUN-IMT). Na

Figura 7, é mostrado o sistema experimental utilizado neste trabalho.

Figura 7: Equipamento utilizado para a realização do trabalho.



Fonte: Autor, 2023.

4.5 Ensaio preliminares

De início, foram realizados ensaios preliminares com o objetivo de verificar o comportamento da *Spirulina* durante a execução nas mesmas condições operacionais e, à vista disso analisar a viabilidade do estudo. As variáveis estudadas foram a temperatura do ar (65 - 85 °C) e vazão de ligante (1,5 - 3,0 mL/min) baseados em trabalhos da literatura (DACANAL, 2005; NASCIMENTO, 2017; ANDREOLA, 2017). Em posse dos resultados dos ensaios preliminares, foi montado a matriz do planejamento experimental, apresentado no item 4.6.

4.6 Planejamento dos ensaios experimentais

Para o estudo proposto, foi utilizado um planejamento do tipo fatorial completo 2^2 , com 3 repetições no ponto central. As variáveis de entrada definidas foram: temperatura do ar de fluidização (T, °C) e vazão de atomização de ligante (Q, mL/min) e como respostas do planejamento foram analisadas: a umidade do pó obtido (U, %), o tamanho médio final de partículas (D_{50} , μm), o rendimento do processo (η , %), fluidez e atividade de água.

Os estudos dos efeitos das variáveis de entrada sobre as respostas estudadas foram estatisticamente analisados utilizando-se o *software Statistica*® 12.0. Na Tabela 3 são mostradas as condições experimentais estudadas no planejamento experimental e na Tabela 4, são mostradas as variáveis operacionais mantidas fixas durante os ensaios.

Tabela 3: Variáveis operacionais e níveis do planejamento fatorial.

Variáveis reais	Variáveis codificadas	Níveis		
		-1	0	1
T (°C)	X_1	65	75	85
Q (mL/min)	X_2	1,5	2,0	2,5

T: temperatura do ar; Q: vazão de atomização do ligante.

Fonte: Autor, 2023.

Tabela 4: Condições operacionais fixadas nos ensaios.

Variável	Nível
Massa da amostra	400 g
Tempo de processo	50 min
Pressão de atomização	10 psig
Altura do bico aspersor em relação à base do leito	230 mm

Fonte: Autor, 2023.

4.7 Teste de Tukey

Foram realizados testes de Tukey para as respostas rendimento de processo e umidade (respostas cujas as condições estudadas foram significativas) e para a composição centesimal do produto em relação biomassa *in natura* com $p < 0.05$ utilizando a calculadora ASTATSA ® (<https://astatsa.com/>).

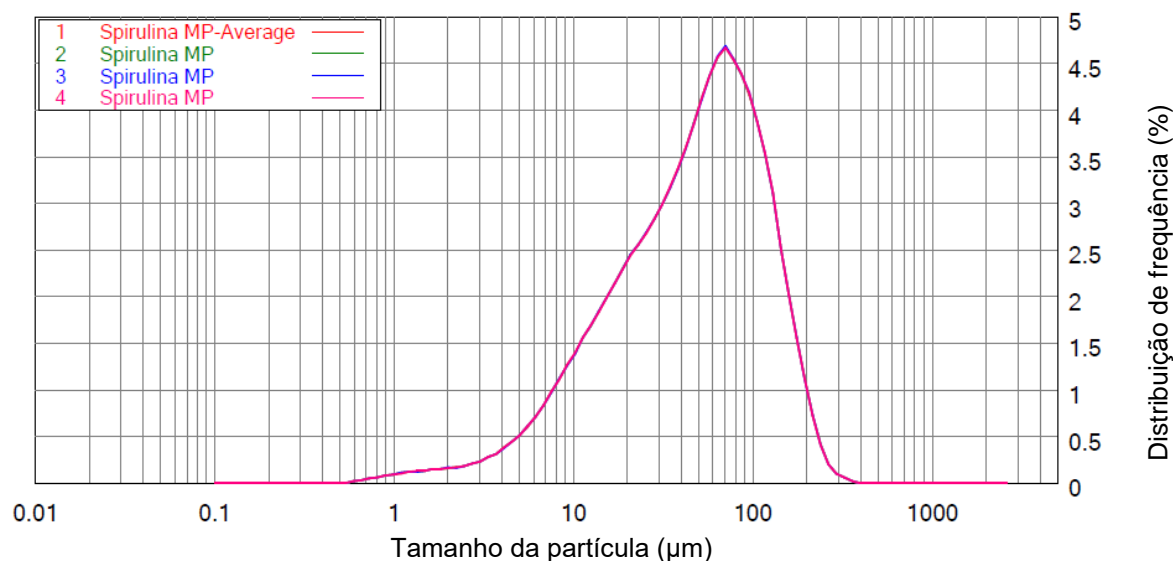
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir, serão apresentados os resultados obtidos nesse trabalho, bem como discussões referentes aos ensaios realizados. Inicialmente, serão mostradas as caracterizações da matéria-prima e do ligante, apresentação dos ensaios preliminares e os ensaios de aglomeração com base nos planejamentos experimentais e por fim, será mostrado a caracterização dos pós obtidos pelo processo de aglomeração.

5.1 Caracterização física da *Spirulina* e da solução ligante

A matéria-prima que foi utilizada é um sólido particulado fino com coloração visualmente verde e possui umidade de $8,0 \pm 0,06$ % (b.u.). As curvas de distribuição de tamanho das partículas (valores médios) obtidas em triplicata por difração a laser para a matéria-prima são apresentadas na Figura 8.

Figura 8: Curvas da distribuição de tamanho das partículas obtidas por difração a laser para a *Spirulina* (base volumétrica).



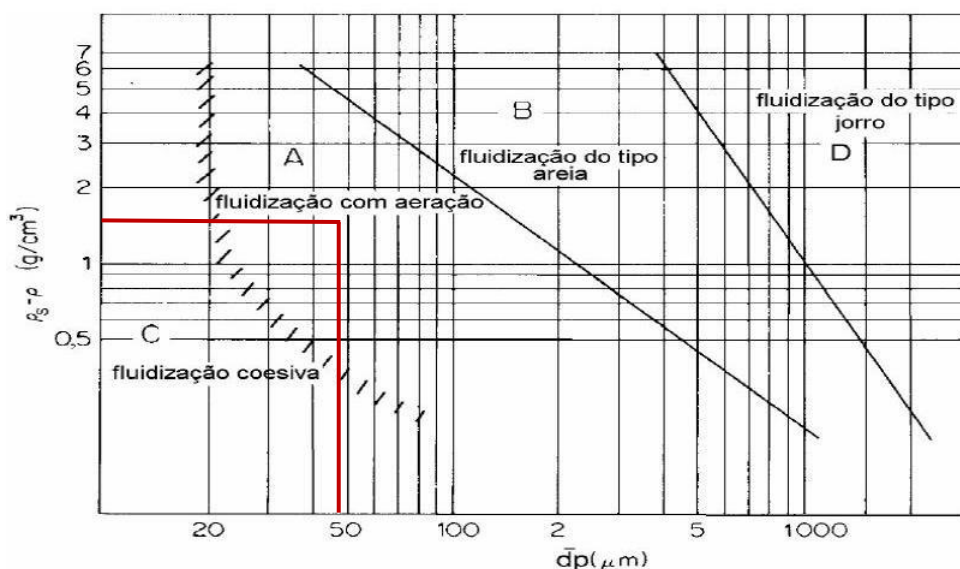
Fonte: Autor, 2023.

Nota-se pela Figura 8, que o tamanho das partículas da *Spirulina platensis* utilizada se estende de um mínimo de, aproximadamente $0,563 \mu\text{m}$ até um máximo de $376,8 \mu\text{m}$, demonstrando que a matéria-prima possui partículas muito finas. Considerando o volume total do material, 90 % das partículas apresentam diâmetro menor que $130,90 \pm 0,10 \mu\text{m}$ (D_{90}), 50% possuem diâmetro menor que $49,47 \pm 0,21$

μm (D_{50}) e 10% das partículas têm diâmetro menor que $10,08 \pm 0,01 \mu\text{m}$ (D_{10}). Esses valores de tamanhos característicos representam a média da triplicata realizada.

A densidade real da *Spirulina platensis* foi de $1,530 \pm 0,01 \text{ g/cm}^3$. Com os resultados do D_{50} e da densidade real, verifica-se que o comportamento fluidodinâmico da matéria-prima pode ser teoricamente classificado no Grupo A de Geldart, como mostrado na Figura 9.

Figura 9: Comportamento fluidodinâmico da *Spirulina platensis* de acordo com o diagrama de Geldart.



Fonte: Adaptado de GELDART, 1973.

Em síntese, pode dizer-se que por pertencer ao Grupo A de Geldart as partículas quando fluidizadas por ar, irão se expandir entre as velocidades acima da velocidade mínima de fluidização e a velocidade de mínimo borbulhamento, sendo assim, há uma região de fluidização não borbulhante que se inicia na velocidade mínima de fluidização, seguida por fluidização borbulhante à medida que se aumenta a velocidade do ar (KUNII e LEVENSPIEL, 1991).

Ressalta-se que, apesar do pó ter sido caracterizado como pertencente ao Grupo A de Geldart, haverá alguma dificuldade de fluidização devido a sua ampla faixa de distribuição de tamanho e a presença de partículas muito finas. Entretanto, por mais que a biomassa da *Spirulina* seja pertencente ao Grupo A de Geldart existem na literatura trabalhos onde foram utilizadas matérias primas *in natura* pertencentes ao mesmo grupo.

Andreola (2017) realizou a aglomeração da proteína concentrada de arroz em pó *in natura* verificando que a distribuição de tamanho das partículas se estende de um mínimo de 1,0 μm a um máximo 2000 μm . Os resultados do D_{50} e da densidade real demonstraram que o comportamento fluidodinâmico da proteína concentrada de arroz *in natura* pode ser teoricamente classificado no Grupo A de Geldart.

Nascimento (2017) realizou a aglomeração da proteína isolada de ervilha caracterizando o pó como sendo fino, com densidade absoluta e diâmetro médio de partículas de, respectivamente, $1,2659 \pm 0,0035 \text{ g/cm}^3$ e $81,00 \pm 0,61 \mu\text{m}$. O comportamento fluidodinâmico da proteína isolada de ervilha pode ser teoricamente classificado como pertencente ao Grupo A de Geldart.

A solução de maltodextrina 30% (m/m) apresentou densidade de $1,1159 \pm 0,01 \text{ g/cm}^3$ e teor de umidade de $70,80 \pm 3,99\%$ (b.u.).

5.2 Análise do rendimento obtido, umidade e atividade de água para o pó de *Spirulina* aglomerado.

A Tabela 5 apresenta a matriz de planejamento fatorial completo 2^2 e os respectivos resultados obtidos em cada condição operacional.

Tabela 5: Matriz do planejamento fatorial completo 2^2 com as respostas obtidas em cada ensaio.

Ensaio	T (°C)	Q (mL/min)	U (%)	η -base seca (%) *
1	65 (-1)	1,5 (-1)	$7,88 \pm 0,12^b$	$52,76^b$
2	85 (+1)	1,5 (-1)	$5,46 \pm 0,13^d$	$46,17^c$
3	65 (-1)	2,5 (+1)	$12,44 \pm 0,11^a$	$54,98^{ab}$
4	85 (+1)	2,5 (+1)	$6,77 \pm 0,06^c$	$59,57^a$
5	75 (0)	2,0 (0)	$7,40 \pm 0,12^c$	$51,07^b$
6	75 (0)	2,0 (0)	$6,89 \pm 0,09^c$	$52,40^b$
7	75 (0)	2,0 (0)	$6,51 \pm 0,10^c$	$54,48^b$

T: temperatura do ar de fluidização; Q: vazão de atomização do ligante; U: umidade do produto (base úmida); η : rendimento do processo (base seca). *O rendimento de processo tem uma variação menor que 1,5 % em triplicatas experimentais. Letras iguais sobrescritas representam que não há diferença estatística entre as amostras pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Fonte: Autor, 2023.

Pela Tabela 5, observa-se que dentro do domínio experimental estudado, o rendimento do processo variou entre 46 e 60 %. Ressalta-se que para todas as condições operacionais do planejamento a maior perda de material ocorreu devido ao

arraste de partículas para o ciclone (elutriação dos finos), e as perdas por incrustação na parede do leito e formação de torrões foram pequenas.

Os maiores rendimentos do processo foram alcançados na condição de alta vazão de atomização do ligante, devido à alta vazão do ligante fazer com que aumente a zona de umedecimento no interior do leito, sendo possível que mais partículas adentrem na zona e tenham sua superfície molhada pelo ligante (LIU et al. 2000; DUN e SUN, 2019), prevalecendo o umedecimento das partículas sobre a secagem. Esse regime evitou a perda por emissão de finos, levando a instabilidade no regime fluidodinâmico devido à baixa movimentação do leito.

Em contrapartida, o menor rendimento do processo foi obtido na condição de menor vazão de atomização do ligante e alta temperatura do ar de fluidização. Nessa condição, possivelmente a secagem prevaleceu sobre o umedecimento das partículas, dificultando a formação de pontes líquidas entre as partículas, sendo assim, obtendo-se uma maior perda de finos por elutriação (LIU et al. 2000; DUN e SUN, 2019).

Além disso, percebe-se que a umidade final do pó aglomerado variou entre 5,46 e 12,44 % (b.u.). De acordo com a Resolução RDC nº 263, de 22 de setembro de 2005, emitida pela ANVISA (Agência Nacional de Vigilância Sanitária) a umidade máxima tolerável para produtos de farinhas e farelos comercializados é de 15,0 % (BRASIL, 2005). Sendo assim, os pós aglomerados obtidos em todas as condições estudadas apresentaram valores de umidade aceitáveis.

Andreola (2017) estudou o processo de aglomeração de proteína concentrada de arroz em um leito fluidizado para as mesmas condições de operações, e obteve como resultado a umidade variando entre 3,32 e 6,46 % utilizando a polpa de uva como ligante e rendimentos em base seca variando entre 56,0 e 64,0 %. Além disso, Andreola (2017) também obteve resultados de umidade entre 3,78 e 8,12 % utilizando solução de alginato de sódio como ligante e rendimentos em base seca variando entre 68,1 e 75,9 %.

O estudo do processo de aglomeração de proteína isolada de ervilha em leito fluidizado com parâmetros de temperatura do ar de fluidização (65 - 85 °C) e a vazão do ligante (2,4 - 3,8 mL/min) gerou como resultados a umidade variando entre 2,1 e 6,5% utilizando a água como agente ligante e rendimentos em base seca variando entre 52,0 e 69,0 %. Ao utilizar a solução de goma arábica como líquido ligante, os

resultados de umidade variaram entre 2,0 e 5,0 % e rendimentos variando entre 60,0 e 75,5 % (NASCIMENTO, 2017).

Machado et al. (2014) estudaram o processo de aglomeração da proteína isolada de soja em leite fluidizado empregando como parâmetros a temperatura do ar de fluidização (60 - 80 °C), a velocidade do ar de fluidização (0,51 - 0,67 mL/min) e a vazão do ligante (1,2 - 2,0 mL/min), obtendo como resultados a umidade variando entre 5,2 e 16,9 % utilizando solução de carboximetilcelulose como líquido ligante e rendimentos variando entre 55,4 e 90,5 %.

A atividade de água (a_w) é um dos parâmetros mais importantes na conservação do alimento, sendo uma medida qualitativa que possibilita avaliar a disponibilidade de água livre que é passível a reações físicas, químicas e biológicas (WELTI e VERGARA, 1997). Segundo Demarco (2020), os valores de a_w em um alimento dependem das suas condições de processamento, como temperatura e tempo de secagem. Na Tabela 6, encontra-se os resultados obtidos para a atividade de água para aproximadamente 25 °C.

Tabela 6: Valores obtidos para a atividade de água (a_w) para aproximadamente 25 °C.

Ensaio	T (°C)	Q (mL/min)	a_w
MP	-	-	0,43 ± 0,01
1	65	1,5	0,41 ± 0,01
2	85	1,5	0,16 ± 0,01
3	65	2,5	0,61 ± 0,01
4	85	2,5	0,28 ± 0,01
5	75	2,0	0,29 ± 0,01
6	75	2,0	0,26 ± 0,01
7	75	2,0	0,26 ± 0,01

Fonte: Autor, 2023.

Enfatiza-se que o comportamento dos substratos com teor de atividade de água menor que 0,6 estão improvavelmente propícios ao crescimento microbiano. A partir de 0,65 começam a proliferação de microrganismos específicos e que até 0,75 algumas bactérias halófitas, leveduras e fungos xerofílicos chegam a se desenvolver (BEAUCHAT, 1981; PUJANINGSIH et al., 2021). Com isso, pelos resultados da

Tabela 6, observa-se que apenas o ensaio 3 apresentou uma atividade de água maior que 0,6.

Minatel (2021) realizou a caracterização físico-química de 8 amostras comerciais diferentes de *Spirulina* em pó produzidas em diferentes países, obtendo-se valores de atividade de água para *Spirulina* em pó variando de 0,2852 a_w até 0,6654 a_w , o que mostra consonância nos resultados obtidos no presente trabalho.

Um estudo sobre a desidratação de microalgas em secador rotatório avaliando as variáveis de temperatura do ar de secagem (50 - 90 °C), fator de enchimento (15 - 27%) e velocidade de rotação (40 - 60 RPM), atingiu valores de atividade de água entre 0,2 - 0,309 (FREITAS, 2017).

Demarco (2020) realizou o estudo sobre a produção e caracterização de pós de *Spirulina* por diferentes métodos de secagem. Ao final de todos os processos de secagem as amostras apresentaram valores de atividade de água entre 0,04 - 0,45.

Avaliando o rendimento do processo, umidade final do produto e a atividade de água estatisticamente diante das alterações de temperatura do ar de fluidização e vazão do ligante, percebe-se que essas três variáveis influenciam significativamente nessas respostas como mostrado pelos gráficos de Paretos com um nível de confiança de 90 % ($p < 0,1$). Ressalta-se que dependendo do nível de confiança escolhido, há possibilidade de ter diferentes respostas quanto à significância dos efeitos.

Salienta-se também que este experimento de aglomeração se trata de natureza complexa, uma vez que compreende uma gama de variáveis intrínsecas e extrínsecas de difícil controle, dessa forma é mais prudente estabelecer um nível de confiança de 90 %, sendo esse suficiente para que o tratamento estatístico dos resultados mostre resultados confiáveis frente aos efeitos.

Nota-se que pela Figura 10 (A), que apenas o efeito linear da variável operacional de vazão de atomização (Q) e a interação das duas variáveis, influenciaram significativamente no rendimento do processo. Identifica-se que o valor do efeito da vazão foi positivo, o que significa que o aumento dessa variável ocasiona um aumento de rendimento no processo.

Por outro lado, pela Figura 10 (B), ambas as variáveis operacionais de vazão de atomização (Q) e temperatura (T), bem como a interação das duas, influenciaram significativamente na umidade do processo. Identifica-se que o valor do efeito da

vazão foi positivo, o que significa que o aumento dessa variável ocasiona um aumento de umidade no processo. Ademais, o efeito linear da temperatura (T) foi negativo, o que significa que o aumento dessa variável resultará em umidades menores.

Na Figura 10 (C) observa-se que as variáveis operacionais de temperatura do ar de fluidização (T) e a vazão de atomização (Q) apresentaram influência significativa nessa resposta. Identifica-se que o valor do efeito da vazão foi positivo, o que significa que o aumento dessa variável ocasiona um aumento de atividade de água nos pós. Ademais, o efeito linear da temperatura (T) foi negativo, o que significa que o aumento dessa variável resultará em pós com atividade de água menores.

O modelo polinomial proposto para a resposta do rendimento do processo (η) é apresentado na Equação 4. A análise de variância (ANOVA) para a resposta do rendimento do processo e os respectivos coeficientes de determinação consta na Tabela 7. Pelos resultados, verificou-se um bom ajuste do modelo aos dados experimentais, já que o coeficiente de determinação (R^2) obtido foi alto ($>0,9$) e, o fator $F_{R,r}$ (regressão) calculado foi superior ao $F_{R,r}$ tabelado, o que demonstra que o modelo é significativo e o fator $F_{faj,ep}$ (falta de ajuste) calculado foi inferior ao $F_{faj,ep}$ tabelado, o que demonstra que o modelo é preditivo.

Nos modelos obtidos para o rendimento de processo e umidade do pó aglomerado, os valores a substituir para Q (entre 1,5 e 2,5 mL/min) e T (entre 65 - 85 °C) são os valores -1 e 1, correspondentes aos níveis inferior e superior do planejamento experimental, sendo o nível 0, correspondente a média (ponto central) dos intervalos das variáveis (Q - 2 mL/min e T - 75 °C).

Como o modelo foi preditivo, a Equação 4 pode ser utilizada para representar o sistema para qualquer valor de vazão do ligante, bem como temperatura do ar de fluidização. Sendo assim, a partir do modelo obtido, a superfície de resposta foi gerada, Figura 11 (A).

$$\eta = 53,06 + 3,9 \cdot Q + 2,79 \cdot T \cdot Q \quad (4)$$

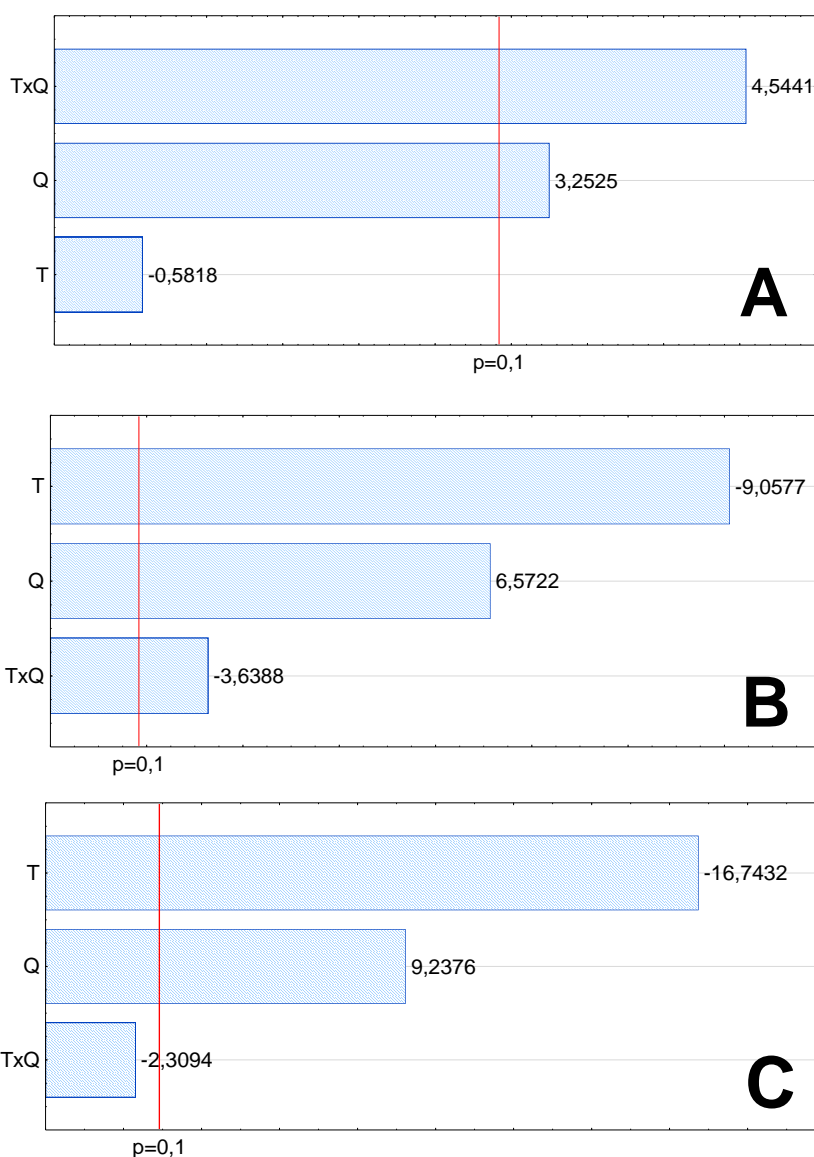
Realizando a análise de variância para a resposta da umidade do processo, verificou-se um bom ajuste do modelo aos dados experimentais, já que o coeficiente de determinação (R^2) obtido foi alto ($>0,9$) e, o fator $F_{R,r}$ calculado foi superior ao $F_{R,r}$ tabelado, o que demonstra que o modelo é significativo e o fator $F_{faj,ep}$ calculado foi inferior ao $F_{faj,ep}$ tabelado, o que demonstra que o modelo é preditivo.

Como o modelo foi preditivo, a Equação 5 pode ser utilizada para representar o sistema para qualquer valor de vazão do ligante, bem como temperatura do ar de fluidização. Sendo assim, a partir do modelo obtido, a superfície de resposta foi gerada, Figura 11 (B).

$$U = 7,62 - 2,02 \cdot T + 1,47 \cdot Q - 0,81 \cdot T \cdot Q \quad (5)$$

Efetuada a análise de variância para a resposta da atividade de água (Tabela 7), verificou-se que o coeficiente de determinação (R^2) obtido foi de 0,86 e, o fator $F_{R,r}$ calculado para a regressão foi superior ao $F_{R,r}$ tabelado, o que demonstra que o modelo é significativo, todavia, o $F_{faj,ep}$ calculado para falta de ajuste foi maior que o $F_{faj,ep}$ tabelado, o que significa que o modelo não é preditivo.

Figura 10: Gráfico de Pareto para o rendimento (A), umidade (B) e atividade de água (C) do processo com $p < 0,1$.



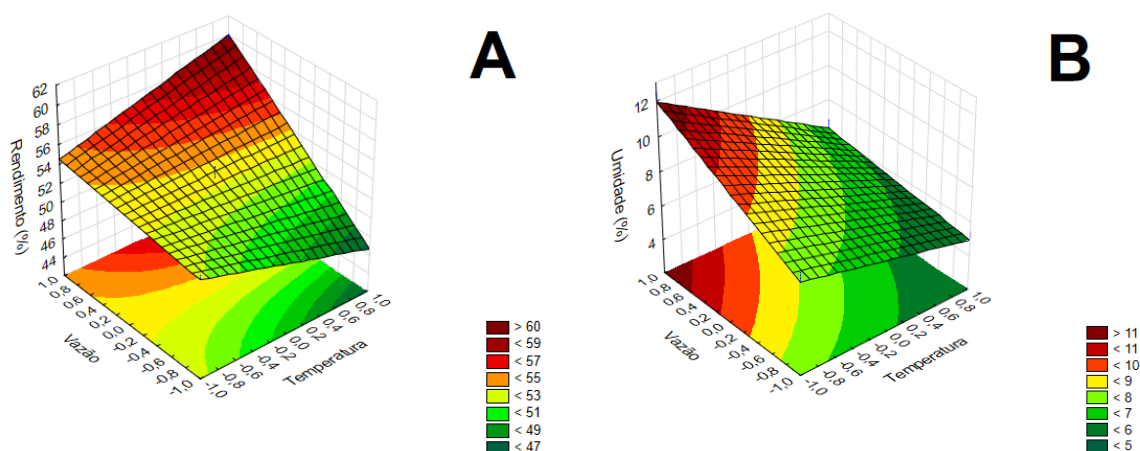
Fonte: Autor, 2023.

Tabela 7: ANOVA para o rendimento, umidade e atividade de água do produto.

Rendimento					
Fonte de variação	Nº de graus de liberdade	Soma Quadrática	Média Quadrática	F calculado	F tabelado
Regressão	2	92,24	41,12	23,66	4,32
Resíduos	4	7,80	1,95		
Falta de ajuste	2	1,89	0,94	0,32	9,00
Erro puro	2	5,91	2,95		
Total	6	100,04			
% variação explicada (R^2): 0,92					
% máxima de variação explicável: 0,94					
Umidade					
Fonte de variação	Nº de graus de liberdade	Soma Quadrática	Média Quadrática	F calculado	F tabelado
Regressão	2	27,62	13,81	19,15	4,32
Resíduos	4	2,88	0,72		
Falta de ajuste	2	2,48	1,24	6,23	9,00
Erro puro	2	0,40	0,20		
Total	6	30,50			
% variação explicada (R^2): 0,90					
% máxima de variação explicável: 0,99					
Atividade de água					
Fonte de variação	Nº de graus de liberdade	Soma Quadrática	Média Quadrática	F calculado	F tabelado
Regressão	2	0,1100	0,0548	12,42	4,32
Resíduos	4	0,0180	0,0044		
Falta de ajuste	2	0,0171	0,0085	28,45	9,00
Erro puro	2	0,0006	0,0003		
Total	6	0,1274			
% variação explicada (R^2): 0,86					
% máxima de variação explicável: 0,99					

Fonte: Autor, 2023.

Figura 11: Superfície de resposta para o rendimento do processo (A) e umidade (B). Os valores nos gráficos para a vazão Q (1,5 - 2,5 mL/min) e temperatura T (65 - 85 °C) estão dentro da faixa do planejamento experimental entre os níveis -1 e +1, sendo o nível 0 o ponto médio.



Fonte: Autor, 2023.

5.3 Distribuição de tamanho das partículas

Na Tabela 8, são mostrados os resultados dos tamanhos característicos (D_{10} , D_{50} , D_{90}), obtidos por difração a laser para a matéria-prima e pós aglomerados e as curvas de distribuição são apresentadas na Figura 12.

Tabela 8: Tamanhos característicos da matéria-prima e pós aglomerados.

Ensaio	T (°C)	Q (mL/min)	Tamanhos característicos		
			D_{10} (μm)	D_{50} (μm)	D_{90} (μm)
MP	-	-	10,08 ± 0,01	49,47 ± 0,02	130,90 ± 0,10
1	65 (-1)	1,5 (-1)	77,62 ± 0,05	173,07 ± 0,15	390,13 ± 0,42
2	85 (+1)	1,5 (-1)	73,24 ± 0,02	147,83 ± 0,12	274,43 ± 0,23
3	65 (-1)	2,5 (+1)	72,61 ± 0,02	171,27 ± 0,15	397,53 ± 1,50
4	85 (+1)	2,5 (+1)	74,35 ± 0,05	170,00 ± 0,53	351,83 ± 9,39
5	75 (0)	2,0 (0)	68,46 ± 0,05	148,13 ± 0,06	269,50 ± 0,56
6	75 (0)	2,0 (0)	73,45 ± 0,07	162,70 ± 0,70	336,73 ± 12,65
7	75 (0)	2,0 (0)	73,25 ± 0,08	160,60 ± 0,20	309,20 ± 0,46

Fonte: Autor, 2023.

Nota-se, pela Figura 12, um tamanho médio de partículas similar para as condições de aglomeração. Ressalta-se que tais variações podem ser explicadas

devido a incapacidade de controlar as variáveis intrínsecas e extrínsecas existentes. Entretanto, constata-se que o processo de aglomeração resultou em um aumento do diâmetro médio das partículas (comparando com a matéria-prima sem aglomerar) em até aproximadamente: 7,7 vezes para D_{10} , 3,5 vezes para o D_{50} e 3 vezes para o D_{90} . Ressalta-se que as diferentes condições do processo influenciaram nas curvas de distribuição de tamanho.

As partículas com tamanhos grandes, porosos e de forma irregular, aumenta de forma mais fácil a capacidade de penetração da água em sua estrutura, promovendo a sua molhabilidade. Por outro lado, as partículas com tamanhos pequenos e de formato regular dificultam a sua molhabilidade devido a redução dos interstícios entre eles (HOGEKAMP e SCHUBERT, 2003; ANDREOLA, 2017).

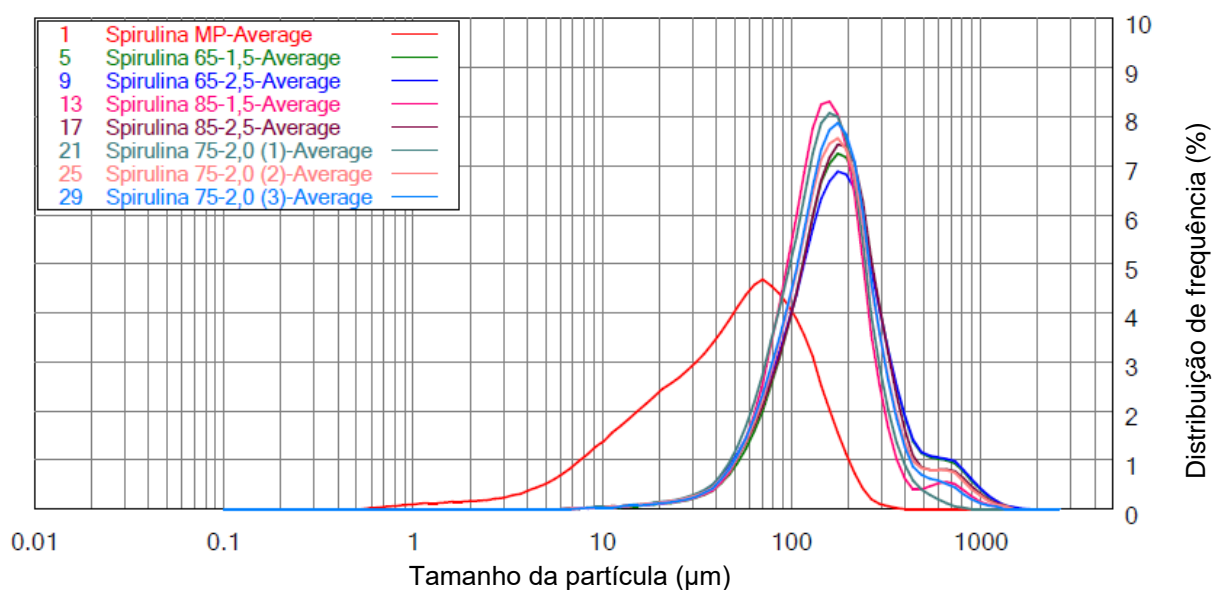
No campo alimentício, esse aumento de partículas pode ser realizado para a produção de produtos ditos como instantâneos, como por exemplo, café solúveis, leite em pó, chocolate em pó, entre outros, nas quais acarretam em diversas vantagens, entre elas: a redução de finos (diminuição de perdas, inalação e riscos de explosão); melhoria nas propriedades de fluidez e manipulação (maior controle de medição do produto e segurança ao manusear); melhoria nas características de dispersão e dissolução; entre outros (IVESON et al. 2001; ANDREOLA, 2017).

Outros autores apontaram a característica do aumento do diâmetro de partículas ao se realizar o processo de aglomeração com outras proteínas e ligantes como: o processo de aglomeração de proteínas vegetais (proteína de ervilha com pó de proteína vegetal) em leite fluidizado utilizando polpa de açaí como ligante (CUSTODIO et al., 2020), proteína isolada do leite (WU et al., 2020; TURCHIULI et al., 2013; JI et al., 2017) e proteína isolada do leite enriquecida com proteína isolada de soja, onde o tamanho médio original foi de 37,4 μm e após a aglomeração a distribuição de tamanho variou entre 42,9 - 52,9 μm . (WU et al., 2020).

Adicionalmente, Nascimento (2017) estudou o processo de aglomeração utilizando água como solução ligante para a aglomerar a proteína isolada de ervilha. Tal estudo permitiu que houvesse aumento de 3,7 vezes no tamanho das partículas e ao usar a solução de goma arábica 15% (m/m) obteve-se um aumento próximo de 5 vezes no diâmetro médio das partículas, ambos em comparação com a matéria-prima que inicialmente possuía um diâmetro médio de 81,00 μm e após a aglomeração a distribuição de tamanho variou entre 302,0 - 358,6 μm . O estudo da aglomeração de

proteína concentrada de arroz utilizando como solução ligante a polpa de uva e soluções aquosas de alginato de sódio resultou no aumento do tamanho médio final das partículas de cerca de 5 vezes, na qual a matéria-prima possuía diâmetro médio de 54,18 μm e após o processo de aglomeração, variou de 189,8 - 273,4 μm (ANDREOLA, 2017).

Figura 12: Curvas da distribuição de tamanho das partículas obtidas por difração a laser para a *Spirulina* em todos os ensaios (base volumétrica).



Fonte: Autor, 2023.

Avaliando o tamanho médio das partículas (D_{50}) do processo estatisticamente diante das alterações de temperatura do ar de fluidização e vazão do ligante, notou-se que nenhuma das variáveis operacionais influenciou significativamente nos resultados do diâmetro médio da partícula (D_{50}). O que significa que variações na temperatura do ar de fluidização e na vazão da solução ligante, não alteraram o diâmetro médio das partículas dentro do domínio experimental proposto. Nota-se que as diferentes condições do processo influenciaram nas curvas de distribuição de tamanho.

Reforça-se que para os casos em que os efeitos não foram significativos a um nível de confiança de 90 % não foram geradas superfícies de resposta devido estas superfícies não poderem ser usadas para fins de predição de resultados, sendo capaz de ser somente feita uma análise qualitativa do processo estudado, assim dizendo, somente poderá ser apontada uma tendência de tal variável resposta em função das variáveis dependentes.

5.4 Fluidez e tempo de molhamento

Na Tabela 9, encontra-se os resultados obtidos dos índices de Carr (I_{Carr}) e de Hausner (I_H), bem como o tempo de molhamento para a matéria-prima e para os pós aglomerados.

Tabela 9: Valores de I_{Carr} e I_H para a matéria-prima e para os produtos obtidos nas condições do planejamento experimental.

Ensaio	T (°C)	Q (mL/min)	I_{Carr} (%)	I_H (-)	Nível de fluidez (I_{Carr})	Nível de fluidez (I_H)	t_m (s)
MP	-	-	33,38 ± 1,56	1,50 ± 0,03	Muito ruim	Muito ruim	> 300
1	65	1,5	18,56 ± 2,20	1,23 ± 0,03	Razoável	Razoável	234
2	85	1,5	17,44 ± 0,97	1,21 ± 0,01	Razoável	Razoável	226
3	65	2,5	14,78 ± 0,77	1,17 ± 0,01	Boa	Boa	8
4	85	2,5	18,45 ± 1,23	1,23 ± 0,02	Razoável	Razoável	3
5	75	2,0	16,64 ± 2,91	1,20 ± 0,04	Razoável	Razoável	136
6	75	2,0	18,57 ± 0,42	1,23 ± 0,01	Razoável	Razoável	150
7	75	2,0	15,51 ± 1,89	1,18 ± 0,03	Razoável	Razoável	144

Fonte: Autor, 2023.

Pelos resultados da Tabela 9, nota-se que para os pós aglomerados, o I_{Carr} mudou de escoamento muito ruim ($I_{Carr} = 33,38\%$ matéria-prima) para valores abaixo de 20 %, ou seja, um ensaio resultou em um pó com bom escoamento (Ensaio 3) e os demais resultaram em pós com escoamento caracterizado como razoável (Ensaios 1-2,4-7). Em relação ao I_H , o nível de fluidez foi alterado de muito ruim ($I_H = 1,50$ matéria-prima) para valores abaixo de 1,25, ou seja, o pó obtido no ensaio 3 apresentou bom escoamento e os pós obtidos nos demais ensaios apresentaram escoamento razoável (Ensaios 1-2,4-7). Liu et al. (2008) reportou que um aumento no tamanho das partículas causa uma redução na razão de Hausner, o que comprova nesse estudo tal fato, sendo esta uma indicação de melhor fluidez com o aumento do tamanho das partículas.

Sendo assim, de maneira geral, o processo de aglomeração resultou em uma melhora do nível de fluidez do pó. Com isso, considera-se este resultado satisfatório, uma vez que essa melhora facilita o manuseio, processamento, armazenamento e transporte do material, uma vez que um fluxo de pó previsível é de fundamental

importância para evitar interrupções de produções que resultam em perda de tempo de produção (PRESCOTT e BARNUM, 2000; DENG et al, 2022).

Pela análise estatística dos valores dos índices de Carr e de Hausner diante das alterações de temperatura do ar de fluidização e vazão do ligante, notou-se que nenhuma das variáveis operacionais influenciou significativamente nessas respostas.

Ressalta-se que outros autores também verificaram melhorias nas propriedades de fluidez após o processo de aglomeração de partículas. Dacanál e Menegalli (2010) obtiveram melhoras na propriedade de fluidez da proteína de soja, com nível alterado de bom (matéria-prima) para muito bom (pó aglomerado com maltodextrina 20% (m/m)). Andreola (2017) obteve melhora nas propriedades de fluidez da proteína concentrada de arroz aglomerada com polpa de uva, com nível alterado de tolerável (matéria-prima) para razoável (pó aglomerado com polpa de uva). Nascimento (2017) obteve melhoras nas propriedades de fluidez de proteína isolada de ervilha aglomerada com água e goma arábica, com níveis alterados de tolerável (matéria-prima) para razoável (pó aglomerado com água) e bom (pó aglomerado com goma arábica 15% (m/m)).

Emprega-se o tempo de dispersão (tempo de molhamento) das partículas do alimento em pó em um líquido para avaliar as propriedades de instantaneização (DACANAL; MENEGALLI, 2010). Alimentos em pó ditos como instantâneos devem umedecer rapidamente e se dispersarem completamente em pouco tempo. Caso não apresente tal propriedade, tende-se a formar grânulos entre as partículas quando misturados em algum meio líquido, necessitando assim, de uma agitação mecânica para sua homogeneização (SKANDERBY et al., 2009).

No âmbito alimentício, produtos ditos como instantâneos são oportunos, uma vez que tem a vantagem de ser preparados pelos consumidores rapidamente e no local que o mesmo irá consumir, sendo este, o tempo de dispersão um dos principais indicativos de qualidade para os pós ditos como instantâneos (JINAPONG, 2008; DACANAL; MENEGALLI, 2010; ANDREOLA, 2017; NASCIMENTO, 2017).

O tempo de instantaneização foi obtido conforme descrito no item 4.2.2.4. e a Figura 13 apresenta as imagens nos tempos de 0, 10, 30, 60, 180 e 300 segundos de contato entre a amostra sem aglomeração (matéria-prima) e a água.

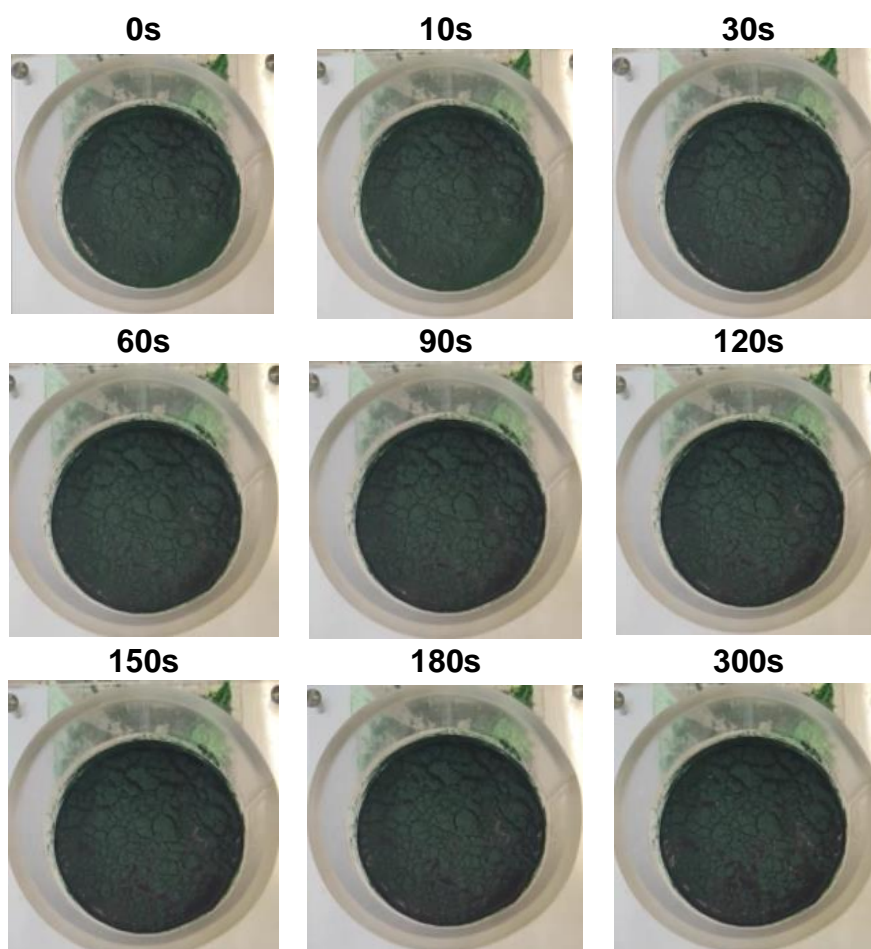
Segundo Schubert (1987), quando o pó é adicionado à superfície de um líquido, a instantaneização evolui quatro etapas separadas e sucessivas, sendo essas: (a)

penetração do líquido no sistema poroso por capilaridade; (b) imersão das partículas no líquido; (c) dispersão do pó com mistura mínima; (d) dissolução das partículas no líquido se forem solúveis.

Pela análise visual da Figura 13, percebe-se que a *Spirulina* (matéria-prima) quando inserida em contato com água, satisfaz somente as duas etapas iniciais em acordo com Schubert (1987), apesar disso, não houve uma completa imersão.

Sabe-se que o tamanho das partículas e a distribuição de tamanho interferem nas propriedades de dispersão. Os pós que possuem partículas de diferentes tamanhos, tendem a possuir um maior tempo de dispersão. Ao mesmo tempo, os pós que possuem partículas muito finas promovem a formação de uma camada hidrofóbica, na qual prejudica o tempo de dispersão e, concomitante, o processo de instantaneização (COLUGNATI, 2003; CUSTODIO et al., 2020), como verificado no material em questão.

Figura 13: Ensaio do tempo de instantaneização para a matéria-prima.



O mesmo teste foi realizado para os pós aglomerados nas condições estudadas. As imagens correspondentes aos tempos de 0, 150 e 300 segundos de contato estão dispostas na Figura 14. Verifica-se visualmente que os mesmos cumpriram com as três etapas iniciais de instantaneização de acordo com Schurbet (1987). Entretanto, não houve uma completa imersão e dispersão. As imagens mais detalhadas do processo ao longo dos tempos encontram-se no Apêndice A para as amostras aglomeradas.

De forma geral, o processo de aglomeração proporcionou uma melhora no processo de instantaneização devido a mudança da estrutura do pó estudado, na qual foi possível notar que os produtos aglomerados puderam se dispersar quando entraram em contato com a água. Para as condições em que foi utilizada alta vazão de atomização do ligante (2,5 mL/min), percebe-se visualmente uma qualidade melhor no processo de instantaneização, se comparando com as outras condições aglomeradas. Salieta-se que, nos grânulos, o ar que fica preso nos poros facilita a penetração da água por capilaridade até o seu interior (COLUGNATI, 2003; ZAFAR et al., 2015).

O tempo de molhamento da matéria-prima foi superior ao limite teste (5 min), enquanto que, para a proteína aglomerada o tempo de molhamento variou entre 3 e 234 segundos. Salieta-se que para ambos os casos, qualificou-se o tempo de molhamento como sendo o tempo requerido para que a água umedecesse a camada mais externa de pó, uma vez que a mesma não cumpriu todos os requisitos propostos por Schubert (1987).

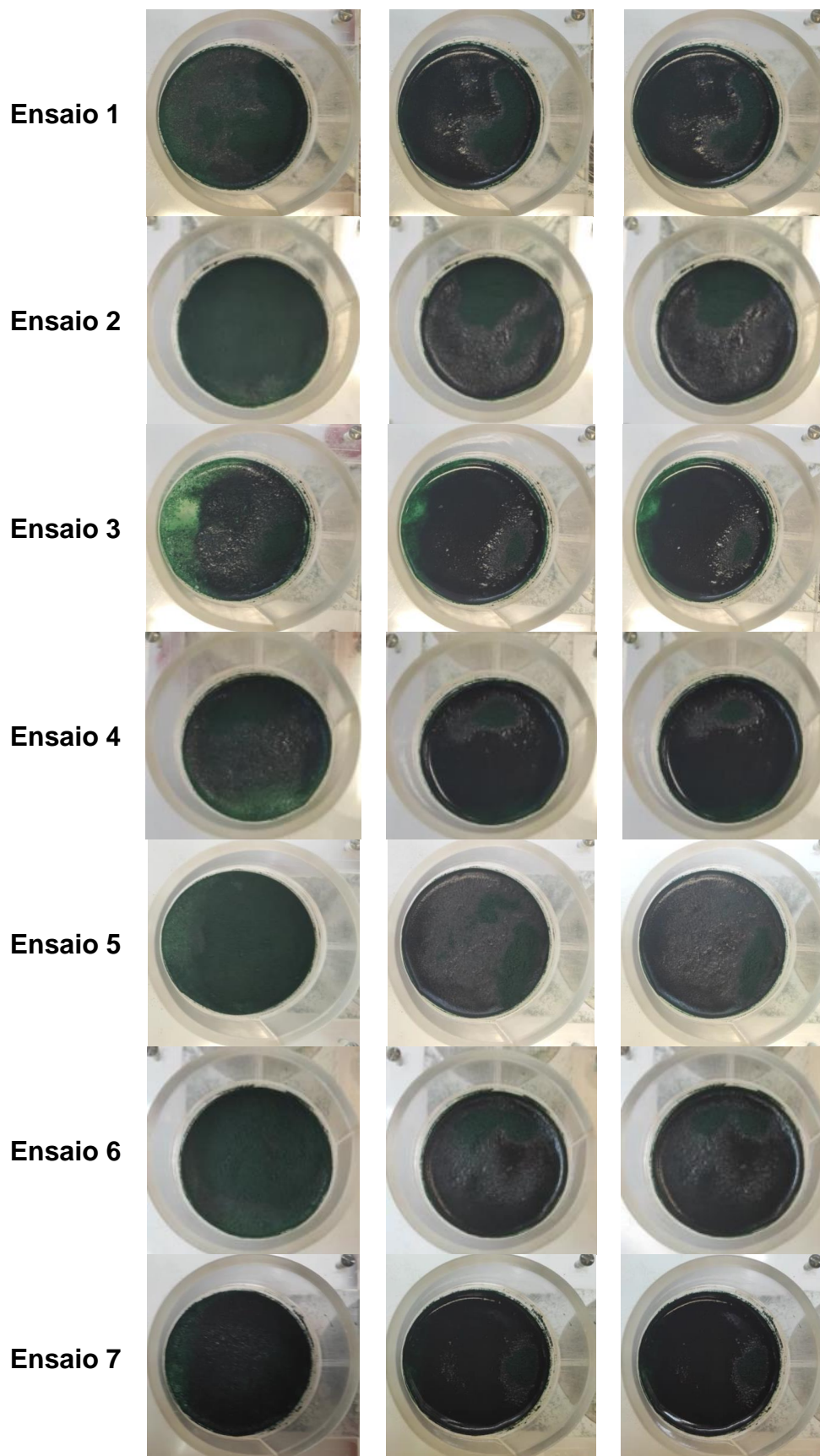
Custodio et al. (2020) investigaram o processo de aglomeração em leite fluidizado de uma mistura de proteína vegetal em pó (pó de proteína de ervilha isolada e pó de proteína de arroz concentrado) utilizando como agente ligante um aglutinante de polpa de açaí. O estudo observou que a aglomeração resultou na diminuição do tempo de molhamento da matéria-prima que é de 206 s se comparado com os pós após a aglomeração que variaram de 32,7 a 137 s.

O estudo da aglomeração da proteína isolada de soja em leite fluidizado pulsado utilizando solução de carboximetilcelulose como líquido ligante mostrou que ao comparar a matéria-prima bruta, o pó aglomerado sofreu umedecimento rápido, embora os mesmos não estivessem completamente imersos na água. O pó aglomerado conseguiu umedecimento completo em menos de 40 s, o que atesta sua

maior capacidade de absorção de umidade e a matéria-prima bruta levou 5 min para atingir o molhamento completo (MACHADO et al., 2014).

Nascimento (2017) ao realizar a aglomeração da proteína isolada de ervilha usando como solução ligante a água verificou que em todos os casos o tempo de instantaneização foi inferior a 10 s, entretanto, ao utilizar como solução ligante a goma arábica 15% (m/m), o tempo de instantaneização foi por volta de 3 s para todos os casos, indicando uma redução de cerca de 97 e 99% no tempo de instantaneização, respectivamente.

Figura 14: Ensaio do tempo de instantaneização para a matéria-prima com aglomeração.



5.5 Análise dos parâmetros de cor

Na Tabela 10 pode-se observar os parâmetros de cor em escala CIEL*a*b* dos pós. Notou-se que nenhuma das variáveis operacionais influenciou significativamente nessas respostas, apesar do produto aglomerado ter se comportado similar em todas as condições estudadas quando comparadas com a matéria-prima utilizada, que foi a perda da característica verde (+ Δa), o aumento da característica azul (- Δb) e o escurecimento da amostra (- ΔL) (entende-se o delta a diferença entre a amostra e a matéria-prima in natura).

Tabela 10: Parâmetros de cor dos pós.

Ensaio	T (°C)	Q (mL/min)	L*	a*	b*
MP	-	-	43,93 ± 0,53	-7,77 ± 0,49	5,14 ± 0,24
1	65 (-1)	1,5 (-1)	35,86 ± 0,10	-2,29 ± 0,08	0,32 ± 0,07
2	85 (+1)	1,5 (-1)	36,32 ± 0,19	-2,36 ± 0,12	0,30 ± 0,09
3	65 (-1)	2,5 (+1)	35,91 ± 0,13	-2,44 ± 0,12	0,39 ± 0,09
4	85 (+1)	2,5 (+1)	35,90 ± 0,07	-2,18 ± 0,09	0,20 ± 0,08
5	75 (0)	2,0 (0)	36,16 ± 0,09	-2,29 ± 0,06	0,22 ± 0,07
6	75 (0)	2,0 (0)	36,13 ± 0,14	-2,29 ± 0,08	0,25 ± 0,10
7	75 (0)	2,0 (0)	35,56 ± 0,07	-1,45 ± 0,08	0,21 ± 0,06

Fonte: Autor, 2023.

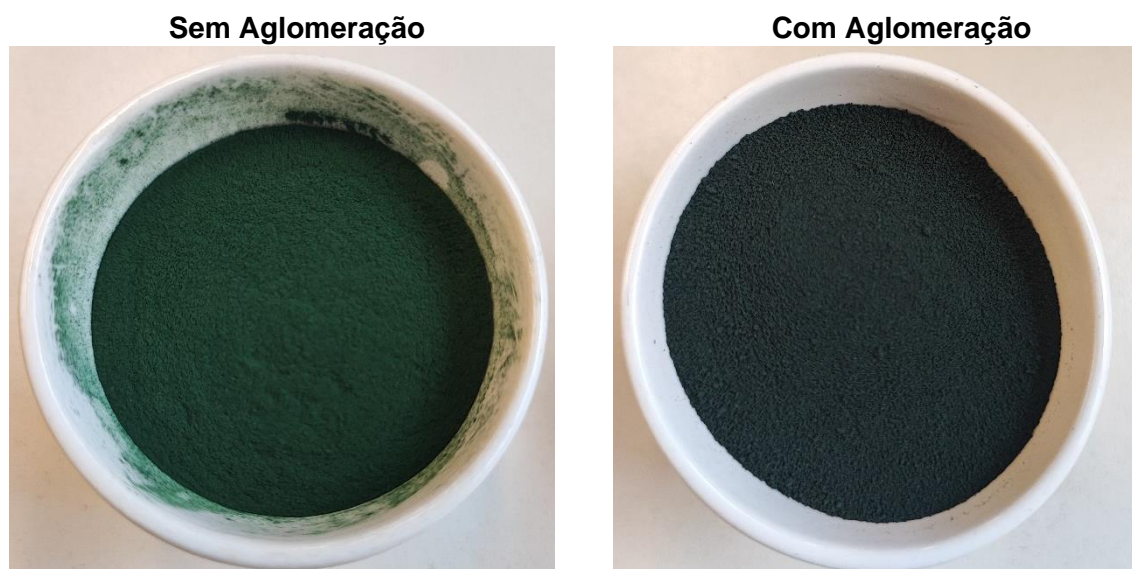
Observa-se na Tabela 10 que houve diferença expressiva entre todos os parâmetros relacionados a cor da *Spirulina* antes e após o processo de aglomeração. Denota-se que o ligante utilizado faz com que os pigmentos presentes na biomassa sejam oxidados, alterando assim a sua coloração. Os pós apresentaram um valor de a* negativo e de b* positivo, o que indica a coloração verde-azulada que é um tom característico da *Spirulina*, pois apresenta em sua estrutura as clorofilas e ficobiliproteínas, que são pigmentos com características principais de solubilidade em água e intensa cor (DUARTE et al., 2008; SUN et al., 2023).

Em geral, segundo Cesa et al. (2017), os parâmetros colorimétricos que são obtidos podem ser influenciados por diversos fatores, entre eles, o meio de cultivo, pH, temperatura, teor de oxigênio, exposição à luz e tipo de processamento aplicado.

De acordo com Teba (2009) a luminosidade relaciona com a quantidade de luz que é refletida pela amostra, ou seja, quanto mais luz é refletida, maior será o valor de L* ou vice-versa. Este componente expressa à intensidade do branco nas amostras

sendo assim, observa-se pela Tabela 10 que matéria-prima por possuir um valor de L^* maior que os outros ensaios, haverá um clareamento na mesma. Na Figura 15 mostra a diferença de cor entre a matéria-prima sem aglomeração e com aglomeração.

Figura 15: Amostras de *Spirulina* sem e com aglomeração.



Fonte: Autor, 2023.

O parâmetro a^* indica a coordenada vermelho/verde (+ a indica vermelho e - a indica verde) como mencionado, valores negativos estão relacionados aos tons verdes, os quais podem ser observados tais valores na Tabela 10. Já o parâmetro b^* , indica a coordenada amarelo/azul (+ b indica amarelo e - b indica azul), onde valores positivos indica que as amostras são mais amarelas.

O aumento do parâmetro a^* indica uma diminuição na intensidade verde, sendo este um fato indicado pela deterioração da clorofila que é pigmento altamente suscetível à degradação durante o processo térmico (VIEIRA et al., 2019).

5.6 Avaliação da melhor condição do processo

Perante os resultados obtidos, constatou-se que as melhores condições de processo foram obtidas no ensaio 4, na qual empregou-se a maior vazão de ligante (2,5 mL/min) e a maior temperatura do ar de fluidização (85 °C), bem como a condição do ponto central (Ensaio 5-7), onde foi utilizada uma vazão de ligante de 2,0 mL/min

e temperatura do ar de fluidização de 75 °C. Nota-se que essas condições resultaram em umidade dos pós dentro do limite estabelecido pela ANVISA (2005), abaixo de 15 % b.u.; rendimento de 59,57 % (Ensaio 4) e rendimento médio de 52,65 % (ponto central). Além disso, nessas condições foi possível obter pós com nível de fluidez razoável, alteração de cor se comparados com a amostra sem aglomeração e um aumento de aproximadamente 3,3 vezes no diâmetro médio das partículas após o processo de aglomeração e atividade de água abaixo de 0,30 a_w .

Reforça-se que essas condições de processo acarretaram no mesmo tempo para finalizar o experimento, o que significa que quanto maior foi a vazão, mais da solução ligante foi consumido durante o regime de atomização. Sendo assim, existe a possibilidade de uma condição ser mais econômica do que a outra, na qual no fim, impactará na melhor decisão de investimento.

Os resultados da composição centesimal da *Spirulina* nas condições definidas nesta seção são apresentados na Tabela 11. Percebe-se apenas uma leve variação da umidade de aproximadamente 6 para um pouco mais de 8% no experimento do ponto central em relação ao experimento conduzido com maior temperatura e vazão de ligante, o que era esperado, pois teve uma maior vazão de ligante. No entanto, para as demais frações as concentrações foram similares para os pós aglomerados.

Tabela 11: Composição centesimal da *Spirulina*.

Constituintes	<i>Spirulina in natura</i>	Pó-aglomerado (T = 75° C / Q = 2,0 mL/min)	Pó-aglomerado (T = 85° C / Q = 2,5 mL/min)
	Teor (%)		
Cinzas	6,76 ± 0,02 ^b	8,35 ± 0,09 ^a	5,89 ± 0,01 ^c
Lipídios	8,83 ± 0,03 ^a	7,05 ± 0,09 ^b	7,93 ± 0,08 ^b
Proteínas	63,90 ± 0,46 ^a	56,26 ± 0,38 ^b	56,84 ± 0,99 ^b
Carboidratos	12,51 ± 0,49 ^a	21,45 ± 0,26 ^b	22,57 ± 0,87 ^b
Umidade	8,00 ± 0,06 ^a	6,89 ± 0,09 ^b	6,77 ± 0,05 ^b

Letras iguais sobrescritas representam que não há diferença estatística entre as amostras pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Fonte: Autor, 2023.

Os resultados apresentados neste estudo para a matéria-prima, quando comparados com outros estudos presentes na literatura, mostram que existe concordância na caracterização da composição centesimal da biomassa *Spirulina platensis*. As distinções em alguns nutrientes podem ser características do sistema de cultivos das microalgas bem como das influências de parâmetros nutricionais e

ambientais (ROSETO-CHASOY et al., 2022; YANG et al., 2022; MICHAEL et al., 2019).

Diversos autores mencionaram valores de composição centesimal para a *Spirulina platensis* similares a biomassa *in natura* ou aglomerada obtida nesse estudo. Tokuşoglu e Unal (2003) obtiveram os seguintes resultados para 3 culturas diferentes: cinzas, variando entre 7,43 e 10,38 %; lipídios, variando entre 7,09 e 8,03 %; proteínas, variando entre 61,32 e 64,43 % e carboidratos, variando entre 15,09 e 15,81 %. Oliveira et al. (1999) reportaram em seu estudo com diferentes temperaturas de biomassa valores de proteínas entre 59,41 e 71,56 %; lipídios entre 6,32 e 7,24 % e carboidratos entre 10,58 e 19,93 %. Becker (2007) apresentou em seu estudo um compilado de valores para *Spirulina* seca. O valor de proteínas variou entre 46 e 63 %, o teor de lipídios variou entre 4 e 9 % e de carboidratos entre 8 e 14 %. Alvarenga et al. (2011) quantificaram em seu estudo um valor de proteína para a *Spirulina* de 58,2 %. Segundo Henrickson (1997) o teor proteínas da *Spirulina* é de 62 %, o teor de cinzas é de 9 %, o teor de lipídios é de 5 % e 19 % de carboidratos.

Ainda, de acordo com FAO (2008) um compilado de resultados realizados por diferentes institutos, mostra os seguintes resultados: FOI (*French Oil Institute*) a biomassa de *Spirulina* apresentou 65 % de proteínas, 4 % de lipídios e 3 % de cinzas; SAC (*Siam Algae Co. Ltd., Tailândia*) apresentou proteína, variando de 55 e 70 %, lipídios, variando de 5 e 7 %, cinzas variando de 3 e 6 % e umidade variando de 4 a 6%; IPGSR (*Institute of Post-graduate Studies and Research laboratory*), que indicaram 61 % de proteínas, 6 % de lipídios, 9 % de cinzas e 6 % de umidade; BAU (*Bangladesh Agricultural University*), por sua vez, reportaram 60 % de proteínas, 7 % de lipídios, 11 % de cinzas e 9 % de umidade.

6 CONCLUSÃO

Por meio dos ensaios fluidodinâmicos, foi possível diante dos objetivos propostos nesse trabalho realizar a aglomeração da cianobactéria *Spirulina platensis*. Em vista operacional, o processo de aglomeração resultou no crescimento de partículas e tal fato promoveu a redução do tempo de instantaneização bem como houve melhora na fluidez do pó, o que facilita operações como manuseio, transporte e armazenagem do produto.

A análise estatística mostrou que a vazão de atomização do ligante foi a variável operacional que influenciou significativamente no rendimento do processo e na umidade e atividade de água, para ambos, a temperatura do ar e a vazão de atomização do ligante apresentaram influência significativa no resultado final.

Com o planejamento experimental, foi possível determinar as melhores condições de processo ($T = 85 \text{ }^\circ\text{C}$ e $Q = 2,5 \text{ mL/min}$ e $T = 75 \text{ }^\circ\text{C}$ e $Q = 2,0 \text{ mL/min}$) por meio de avaliação dos resultados de rendimento do processo e qualidade dos pós aglomerados.

Nas melhores condições de processo, foi possível observar um aumento no tamanho médio das partículas de cerca de 3,5 vezes e rendimentos acima de 50 %, proporcionando um pó proteico com umidade dentro do limite tolerável estabelecido pela ANVISA, além de melhoras nas propriedades de instantaneização e fluidez, em relação à matéria-prima.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABD EL BAKY, H. H.; EL BAROTY, G. S.; IBRAHEM, E. A. Functional characters evaluation of biscuits sublimated with pure phycocyanin isolated from *Spirulina* and *Spirulina* biomass. **Nutricion Hospitalaria**, 32(1), p. 231-241, 2015.
<https://doi.org/10.3305/nh.2015.32.1.8804>.
- ABD EL BAKY, H. H.; EL BAROTY, G. S.; MOSTAFA, E. M. Optimization Growth of *Spirulina (Arthrospira) Platensis* in Photobioreactor Under Varied Nitrogen Concentration for Maximized Biomass, Carotenoids and Lipid Contents. **Recent Pat Food Nutr Agric**, 11(1), p. 40-48, 2020.
<https://doi.org/10.2174/2212798410666181227125229>.
- ALVARENGA, R.; RODRIGUES, B.; CANTARELLI, S.; ZANGERONIMO, G.; JÚNIOR, S.; SILVA, R.; SANTOS, M.; PEREIRA, J. Energy Values and Chemical Composition of *Spirulina (Spirulina platensis)* Evaluated with Broilers. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 40, p. 992-996, 2011.
- AMBROSI, MA; REINERHR, C.O; BERTOLIN, T.E; COSTA, J.A. V; COLLA, L.M. Propriedades de saúde de spirulina spp. **Revista de Ciências Farmacêuticas Básica e Aplicada**, Rio Grande, v. 29, n. 2, p. 109-117, 2008.
- ANDREOLA, K. Aglomeração de proteína concentrada de arroz em leite fluidizado : monitoramento in-line do tamanho de partícula. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2017.
- ANVISA (Agência Nacional de Vigilância Sanitária). Instrução Normativa - in nº 102, de 26 de outubro de 2021. Diário Oficial da União. Publicado em: 20/10/2021 | edição: 198 | seção: 1 | página: 113. 2021.
- AOAC. **Official methods of analysis of the Association of official analytical chemists**. 16. ed. Washington, 1995.
- ASHBY, M. K.; HOUMARD; J. Cyanobacterial two-component proteins: structure, diversity, distribution, and evolution. **Microbiology and Molecular Biology Reviews**, v. 70, n. 2, p.472-509, 2006.
- AVILÉS-AVILÉS, C.; DUMOULIN, E.; TURCHIULI, C. Fluidized bed agglomeration of particles with different glass transition temperatures. **Powder Technology**, v. 270, p. 445-452, 2015.
- BARKALLAH M.; DAMMAK M.; LOUATI I.; HENTATI F.; HADRICH B.; MECHICHI T.; AYADI M. A; FENDRI I.; ATTIA H.; ABDELKAFI S. Effect of *Spirulina platensis* fortification on physicochemical, textural, antioxidant and sensory properties of yogurt during fermentation and storage. **Food Sci. Technol**, 84, p. 323-330, 2017.

BARROS, K. K. S. Produção de biomassa de *Arthrospira platensis* (Spirulina platensis) para alimentação humana. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2010.

BECKER, B.W. Micro-algae as a source of protein. **Biotechnology Advances**, v.25, n.2, p.207-210, 2007.

BERNARDES, L. J. L. A granulação de materiais. **Cerâmica Industrial**, v. 11, n. 3, 2006.

BEAUCHAT, L. R. Influence of aw on growth, metabolic activities and survival of yeasts and molds. **J. Food Protect.**, Ames, 46:135-41, 1983.

BRASIL. **8ª edição do Documento de Perguntas e Respostas sobre Suplementos Alimentares**. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Disponível em: <https://www.gov.br/anvisa/pt-br/centraisdeconteudo/publicacoes/alimentos/perguntas-e-respostas-arquivos/suplementos-alimentares-1.pdf/view>. Acesso em 16 de junho de 2023.

BRASIL. Resolução RDC nº 263, de 22 de setembro de 2005. Aprova o “**Regulamento técnico dos produtos de cereais, amidos farinhas e farelos**” constante do anexo desta resolução. Órgão emissor: Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Disponível em: <https://www.gov.br/anvisa/pt-br/assuntos/alimentos/informes/>. Acesso em 16 de junho de 2023.

BURGGRAEVE, A.; MONTEYNE, T.; VERVAET, C.; REMON, J. P.; BEE T. Process analytical tools for monitoring, understanding, and control of pharmaceutical fluidized bed granulation: A review. **Eur J Pharmaceut Biopharmaceut**, v.83(1), p.2-15, 2013.

CARR, R. L. Classifying flow properties of solids. **Chemical Engineering**, v. 72, n. 3, p. 69-72, 1965.

CESA, S.; CARRADORI, S.; BELLAGAMBA, G.; LOCATELLI, M.; CASADEI, M. A.; MASCI, A.; PAOLICELLI, P. Evaluation of processing effects on anthocyanin content and colour modifications of blueberry (*Vaccinium spp.*) extracts: comparison between hplc-dad and cielab analyses. **Food Chemistry**, [S.L.], v. 232, p. 114-123, 2017.

CELEKLI, A.; TOPYUREK, A.; MARKOU, G.; BOZKURT, H. A Multivariate Approach to Evaluate Biomass Production, Biochemical Composition and Stress Compounds of *Spirulina platensis* Cultivated in Wastewater. **Appl. Biochem. Biotechnol.**, 180, p. 728-739, 2016.

COLUGNATI, P. G. Propriedades físicas e funcionais de aglomerados a base de proteína de soja. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia de Alimentos, Campinas, SP, 2003.

COSTA, J. A. V.; MORAIS, M. G. The role of biochemical engineering in the production of biofuels from microalgae. **Bioresource Technology**, 102, p. 2-9, 2011.

CUSTODIO, G. R.; ANDREOLA, K. Estudo do processo de aglomeração de proteínas vegetais em leite fluidizado utilizando polpa de açaí como ligante. Instituto Mauá de Tecnologia, São Caetano do Sul, 2018.

CUSTODIO, G. R.; SOUZA, L. F. G.; NITZ, M.; ANDREOLA, K. A protein powder agglomeration process using açaí pulp as the binder: An analysis of the process parameters. **Advanced Powder Technology**, 31, p. 3551-3561, 2020.

DA CUNHA, R. L. G.; PEREIRA, M. M. C.; ROCHA, S. C. S. Conventional and modified fluidized bed: Comparison of the fluid dynamics and application in particle granulation. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, v. 48, n. 5, p. 1004-1011, 2009.

DACANAL, G. C. Estudo da granulação de suco de acerola desidratado em leite fluidizado. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.

DACANAL, G. C. Aglomeração de polpa de acerola e proteína isolada de soja em pó em leite fluidizado cônico e pulsado. Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2009.

DACANAL, G. C.; MENEGALLI, F. C. Selection of operational parameters for the production of instant soy protein isolate by pulsed fluid bed agglomeration. **Powder Technology**, v. 203, n. 3, p. 565-573, 2010.

DACANAL, G. C.; HIRATA, T. A. M.; MENEGALLI, F. C. Fluid dynamics and morphological characterization of soy protein isolate particles obtained by agglomeration in pulsed-fluid bed. **Powder Technology**, v. 247, p. 222-230, 2013.

DEMARCO, M. Produção e caracterização de pós de spirulina por diferentes métodos de secagem. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciência dos Alimentos, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2020.

DENG, T.; GARG, V.; DIAZ, L. P.; MARKL, D.; BROWN C.; FLORENCE, A.; BRADLEY, M. S. A. Comparative studies of powder flow predictions using milligrams of powder for identifying powder flow issues. **International Journal of Pharmaceutics**, v. 628, 2022.

DU, J.; BÜCK, A.; TSOTSAS, E. Influence of process variables on spray agglomeration process in a continuously operated horizontal fluidized bed, **Powder Technology**, 2019.

DUARTE, J.; LEGGEMANN, M.; OLIVEIRA, E.; CREXI, V.; PINTO, L. A. Índice de TBA e avaliação da cor da microalga *Spirulina platensis* desidratada em camada delgada. In: XVII Congresso de Iniciação Científica, 2008.

DUN, J.; SUN, C. C. Chapter 4 - Structures and Properties of Granules Prepared By High Shear Wet Granulation. Handbook of Pharmaceutical Wet Granulation, **Academic Press**, p. 119-147, 2019.

EL-SAYED, A.E. K.; MOSTAFA, E. S. Outdoor cultivation of *Spirulina platensis* for mass production. **Not. Sci. Biol.**, 10, p. 38-44, 2018.

EUROPEAN PHARMACOPOEIA 7.0. Methods of analysis. 2.9.3.4 **Bulk density and tapped density of powders**, p. 305-308, 2010.

FAO. A review on culture, production and use of *Spirulina* as food for humans and feeds for domestic animals and fish, Rome, 2008.

FERNANDES, Samara Pereira Freire. Avaliação físico-química e sensorial de cookies com diferentes concentrações de *Spirulina platensis*: uma alternativa de lanche nutritivo para crianças. Trabalho de Conclusão de Curso (Monografia), Curso de Bacharelado em Nutrição, Centro de Educação e Saúde, Universidade Federal de Campina Grande, Cuité - Paraíba - Brasil, 2015.

FREITAS, L. V. D. Estudo sobre a desidratação de microalgas em secador rotatório. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017.

FRÖHLICH J. A.; RUPRECHT N. A.; HINRICHS J.; KOHLUS R. Nozzle zone agglomeration in spray dryers: Effect of powder addition on particle coalescence. **Powder Technol.**, 374, p.223-232, 2020.

GALARZA, J. I.; DELGADO, N.; HENRÍQUEZ, V. Cisgenesis and intragenesis in microalgae: promising advancements towards sustainable metabolites production. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v.100, p.10225-10235, 2016.

GELDART, D. Types of gas fluidization, Fluidization of cohesive powders. **Powder Technology**, v. 7, p. 285-292, 1973.

GELDART, D.; HARNBY, N.; WONG, A.C. Fluidization of cohesive powders. **Powder Technology**, v. 37, p. 25-37, 1984.

GOLMAKANI, M. T.; MOAYYEDI, M.; RAISSJALALI, A.; PASARAN, Y.; AGHAJANI, A. Investigation of physicochemical, nutritional, textural and sensory Properties of Iranian Yazdi cupcake enriched with *Spirulina* (*Arthrospira platensis*). In: **International Conference on Latest Trends in Food, Biological & Ecological Sciences**. Dubai (UAE), 7, p. 11-12, 2015.

HAFSA Y. A.; AMEL D.; SAMIA S.; SIDAHMED S. Evaluation of nutritional and sensory properties of bread enriched with *Spirulina*. **Annals. Food Sci. and Technol.** 15 (2), p. 31-34, 2014.

HAIDER, C. I.; NIEDERREITER, G.; PALZER, S.; HOUNSLOW, M. J.; SALMAN, A. D. Unwanted agglomeration of industrial amorphous food powder from a particle perspective. **Chemical Engineering Research and Design**, 132, p. 1160-1169, 2018.

HAUSNER, H. H. Friction Conditions in a Mass of Metal Powder. **International Journal of Powder Metallurgy**, v. 3, n. 4, p. 7-13, 1967.

HENRICKSON, R. Earth Food. How Remarkable Blue Green Algae Can Transform Your Health and Our Planet. Ronores Enterprises, Kenfood, 1997.

HOGKAMP, S.; SCHUBERT, H. Rehydration of food powders. **Food Science and Technology International**, v. 9, n. 3, p. 223-235, jun, 2003.

HORIO, M. Fluidization in natural phenomena, reference module. In: **Chemistry, Molecular Sciences and Chemical Engineering** (ed. J. Reedijk). Waltham, MA: Elsevier, 2017.

HOSSEINI, S. M.; SHAHBAZIZADEH, S.; KHOSRAVI-DARANI, K.; MOZAFARI, M. R. *Spirulina paltensis*: food and function. **Current Nutrition and Food Science**, 9, p. 189–193, 2013.

HU, Q. Industrial production of microalgal cell-mass and secondary products major industrial species: *Arthrospira (Spirulina) platensis* In: RICHMOND, A. (Ed). **Handbook of microalgal culture: biotechnology and applied phycology**. Oxford: Blackwell Science, 2004. p.264-272.

INSTITUTO ADOLFO LUTZ. **Métodos físico-químicos para análise de alimentos**. 4 ed. 1a edição digital. São Paulo: Instituto Adolfo Lutz, 2008.

IVESON, S. M.; LITSTER, J. D.; HAPGOOD, K.; ENNIS, B. J. Nucleation, growth and breakage phenomena in agitated wet granulation processes: a review. **Powder Technology**. v. 117, p. 3-39, 2001.

JINAPONG, N.; SUPHANTHARIKA, M.; JAMNONG, P. Production of instant soy milk powders by ultrafiltration, spray drying and fluidized bed agglomeration. **Journal of Food Engineering**, v. 84, p. 194-205, 2008.

JI, J.; CRONIN, K.; FITZPATRICK, J.; MIAO, S. Enhanced wetting behaviours of whey protein isolate powder: The different effects of lecithin addition by fluidised bed agglomeration and coating processes. **Food Hydrocoll.**, 71, p. 94-101, 2017.

JONG, J. A. H.; HOFFMANN, A. C.; FINKERS, H. J. Properly determine powder flowability to maximize plant output. **Chemical Engineering Progress**, v. 95, n. 4, p. 25-33, 1999.

KNIGHT, P. C. Structuring agglomerated products for improved performance. **Powder Technology**, v. 119, n. 1, p. 14-25, 2001.

KOTMARTHY, L.; RAMACHANDRAN, R. Mechanistic understanding of the effects of process and design parameters on the mixing dynamics in continuous twin-screw granulation. **Powder Technol.**, 390, p. 73-85, 2021.

KUMAR D. Nutritional and organoleptic attributes of novel pancake fortified with *Spirulina* (*Arthrospira platensis*). **International Journal of Applied Home Science**, 4 (9 & 10), p. 785-789, 2017.

KUNNI, D.; LEVENSPIEL, O. **Fluidization Engineering**. 2. ed. Boston, MA: Butterworth-heinemann, 1991.

KUNII, D.; LEVENSPIEL, O. **Fluidization Engineering**. 2.ed. New York: John Wiley, 1991, p.489.

LIMA R.I F.; M. FORMIGA W. A.; FREITAS P. V. C.; NÓBREGA É. M. G. A.; PAIVA Y. F.; SILVA E. V. Composição nutricional de cookies enriquecidos com *Spirulina platensis*. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 10, 2022.

LITSTER, J.; ENNIS, B. **The Science and Engineering of Granulation Processes**. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2004.

LIU, L. X.; MARZIANO, I.; BENTHAM, A. C.; LITSTER, J. D.; WHITE, E. T.; HOWES, T. Effect of particle properties on the flowability of ibuprofen powders. **International Journal of Pharmaceutics**, 362 (1-2), 109-117, 2008.

LIU, H.; et al., Using the Box-Behnken experimental design to optimise operating parameters in pulsed spray fluidised bed granulation. **International Journal of Pharmaceutics**, 448(2): p. 329-38, 2013.

LIU, L. X.; LITSTER, J. D.; IVESON, S. M.; ENNIS, B. J. Coalescence of deformable granules in wet granulation processes. **AIChE Journal**, v. 46, n. 3, p. 529-539, 2000.

LUCAS, B. F.; MORAIS, M. G.; SANTOS, T. D.; COSTA, J. A. V. Effect of *Spirulina* addition on the physicochemical and structural properties of extruded snacks. **Food Sci. Technol.**, 37, p. 16-23, 2017.

LUCAS, B. F.; MORAIS, M. G.; SANTOS, T. D.; COSTA, J. A. V. *Spirulina* for snack enrichment: Nutritional, physical and sensory evaluations. **Food Sci. Technol.**, 90, p. 270-276, 2018.

MACHADO, V. G.; HIRATA, T. A. M.; MENEGALLI, F. C. Agglomeration of soy protein isolate in a pulsed fluidized bed: Experimental study and process optimization. **Powder Technology**, v. 254, p. 248-255, 2014.

MARKOU, G.; KOUZIA E.; ARAPOGLOU, D.; CHENTIR, I.; ANDREOU, V.; TZOVENIS, I. Production of *Arthrospira platensis*: Effects on Growth and Biochemical Composition of Long-Term Acclimatization at Different Salinities. **Bioengineering**, 10(2), 233, 2023.

MATSUDO, Marcelo Chuei. Cultivo de *Spirulina platensis* por processo descontínuo alimentado repetitivo utilizando uréia como fonte de nitrogênio. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

MICHAEL, A.; KYEWALYANGA, M.S.; LUGOMELA, C.V. Biomass and nutritive value of *Spirulina (Arthrospira fusiformis)* cultivated in a cost-effective medium. **Ann Microbiol** , 69, p. 1387-1395, 2019.

MINATEL, G.G. Caracterização de biomassas comerciais de spirulina para uso como ingrediente. TCC (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Ciências Agrárias, Ciência e Tecnologia de Alimentos, 2021.

MONTES, E. C.; DOGAN, N.; NELISSEN, R.; MARABI, A.; DUCASSE, L.; RICARD, G. Effects of drying and agglomeration on the dissolution of multi-component food powders. Anais: **17th International Drying Symposium (IDS 2010)**, Magdeburg, Germany, 3-6 October 2010, p. 1619-1622, 2010.

NASCIMENTO, R. F. Estudo do processo de aglomeração de proteína isolada de ervilha em leite fluidizado pulsado. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2017.

NEUMANN, C.; VELTEN, S.; LIEBERT, F. **The graded inclusion of algae (*Spirulina platensis*) or insect (*Hermetia illucens*) meal as a soybean meal substitute in meat type chicken diets impacts on growth, nutrient deposition and dietary protein quality depending on the extent of amino acid Supple.** Open J. Anim. Sci. 2018, 8, p.163-183.

OLIVERA, M.A.C.L.; MONTEIRO, M.P.C.; ROBBS, P.G.; LEITE, S.G.F. Growth and Chemical Composition of *Spirulina Maxima* and *Spirulina Platensis* Biomass at Different Temperatures. **Aquaculture International**, 7, p. 261–275, 1999.

OLIVEIRA, T. T. B.; REIS, I. M.; SOUZA, M. B.; BISPO, E. S.; MACIEL, L. F.; DRUZIAN, J. I.; TAVARES, P. P. L. G.; CERQUEIRA, A. O.; MORTE, E. S. B.; GLÓRIA, M. B. A. Microencapsulation of *Spirulina* sp. LEB-18 and its incorporation in chocolate milk: properties and functional potential. *Lwt*, [S.L.], v. 148, p. 111674, 2021. **Elsevier BV**.

PARRY NUTRACEUTICALS. Notice do US Food and Drug Administration that the use of certified organic *Spirulina (Arthrospira platensis)* is generally recognized safe. AIBMR Life Sciences, Inc. 2012.

PATEL, P.; JETHANI, H.; RADHA, C.; VIJAYENDRA, S. V. N.; MUDLIAR, S. N.; SARADA, R.; CHAUHAN, V. S. Development of a carotenoid enriched probiotic

yogurt from fresh biomass of *Spirulina* and its characterization. **J. Food Sci.** 56 (8), p. 3721-3731, 2019.

PERON, B.C. Desenvolvimento de massa alimentícia sem glúten com adição de *Spirulina platensis*. Universidade Federal do Paraná, 2015.

PRESCOTT, J. K.; BARNUM, R. A. On powder flowability. **Pharmaceutical Technology**, v.24, n. 10, p. 60-85, 2000.

PUJANINGSIH, R. I.; WIDIYANTO; BAGINDA, I. M. T.; SRI, M.; HILMIYATUN, N. Total bacteria, total fungus, and water activity content of multinutrient block with green beetle leaf levels added as feed supplements for goat. IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci., 667(1): 012027, 2021.

RIBEIRO, M. S. R. Estudo Fluidodinâmico de Um Leito Fluidizado Pulsado Rotativo Com Partículas Secas e Úmidas. Faculdade de Engenharia Química. UNICAMP, 2005.

ROSERO-CHASOY, G.; RODRÍGUEZ-JASSO, R. M.; AGUILAR, C. N.; BUITRÓN, G.; CHAIREZ, I.; RUIZ, H. A. Growth kinetics and quantification of carbohydrate, protein, lipids, and chlorophyll of *Spirulina platensis* under aqueous conditions using different carbon and nitrogen sources, **Bioresource Technology**, 346, 2022.

ŞAHIN, O.I. Functional and sensorial properties of cookies enriched with *SPIRULINA* and *DUNALIELLA* biomass. **Food Sci. Technol.**, 57, p. 3639-3646, 2020.

SCHUBERT, H. Food Particle Technology. Part I: Properties of Particles and Particulate Food Systems, **Journal of Food Engineering**, v. 6, p. 1-32, 1987.

SHABANA, E. F.; MAHMOUD ALI GABR, M. A. G.; MOUSSA, H. R.; EL-SHAER, E. A.; ISMAIEL, M. M.S. Biochemical composition and antioxidant activities of *Arthrospira (Spirulina) platensis* in response to gamma irradiation. **Food chemistry**, Londres, v. 214, p. 550-555, 2017.

SINGH, A.K.; TSOTSAS, E. Stochastic model to simulate spray fluidized bed agglomeration: A morphological approach. **Powder Technol.**, 355, p. 449-460, 2019.

SMALL, E. *Spirulina* - food for the universe. **Biodiversity**, 12(4), p. 255-265, 2011.

SKANDERBY, M.; WESTERGAARD, V.; PARTRIDGE, A.; MUIR, D. D. Dried Milk Products. **Dairy Powders And Concentrated Products**, [S.L.], p. 180-234, 2009.

SUN, H.; WANG, Y.; HE, Y.; LIU, B.; MOU, H.; CHEN, F.; YANG, S. Microalgae-Derived Pigments for the Food Industry. **Mar. Drugs**, 21, 82, 2023.

TAKEITI, C. Y. Estudo da influência da transição vítrea sobre a instantaneização de maltodextrinas por processo de aglomeração úmida. Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007.

TEBA, C. S. Elaboração de massas alimentícias pré-cozidas à base de farinha mista de arroz polido e feijão preto sem casca pelo processo de extrusão termoplástica. Dissertação. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Seropédica - Rio de Janeiro, 2009.

TOKUŞOĞLU, O.; UNAL, M. K. Biomass nutrient profiles of three microalgae: *Spirulina platensis*, *Chlorella vulgaris*, and *Isochrysis galbana*. **Journal of Food Science**, vol. 68, no. 4, p. 1144-1148, 2003.

TOMASELLI, I. Morphology, ultrastructure and taxonomy of *Arthrospira* (*Spirulina*). In: VONSHAK, A. ***Spirulina platensis* (Arthrospira) Physiology, cell-biology and biotechnology**. London: Taylor & Francis. ISBN 0-7484-0674-3, 1997.

TURCHIULI, C.; ELOUALIA, Z.; MANSOURI, N. E.; DUMOULIN, E. Fluidised bed agglomeration: Agglomerates shape and end-use properties. **Powder Technology**, v. 157, p. 168-175, 2005.

TURCHIULI, C.; SAMIL, R.; DUMOULIN, E. Fluidized bed agglomeration of skim milk powder: Analysis of sampling for the follow-up of agglomerate growth. **Powder Technology**, v. 238, p. 161-168, 2013.

UEBEL, L.S. Planta industrial para produção de *Spirulina*: variáveis físico-químicas, respostas biológicas e aplicação de normas de garantia da qualidade. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência de Alimentos) Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Alimentos, Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, 2017.

VIEIRA, R.C.; MEDEIROS, J. A.; NASCIMENTO, M. A. A.; ABUD, A. K. S.; RAYMUNDO, A.; SILVA C. E. F. Chapter 2 - Microalgae as sustainable food: incorporation as strategy in the formulation of functional food. *New and Future Developments in Microbial Biotechnology and Bioengineering*, **Elsevier**, p. 19-30, 2020.

VIERA, I.; PÉREZ-GÁLVEZ, A.; ROCA, M. Green natural colorants. **Molecules**, 24:154, 2019.

VIEGAS, T. R. Aglomeração de colágeno hidrolisado em leite fluidizado com água e polpa de amora. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química, Campinas, SP, 2017.

VISSOTTO, F. Z. Estudo do processo de aglomeração com vapor e perda de qualidade por *caking* de achocolatados em pó. Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2014.

VISSOTTO, F. Z.; MONTENEGRO, F. M.; SANTOS, J. M.; OLIVEIRA, S. J. R. Avaliação da influência dos processos de lecitinação e de aglomeração nas

propriedades físicas de achocolatado em pó. **Ciência e Tecnologia de Alimentos. Campinas**, v.26, n.3, p. 666-671, 2006.

VOGT, E. T. C.; WECKHUYSEN, B. M. Fluid catalytic cracking: recent developments on the grand old lady of zeolite catalysis, **Chemical Society Reviews**, Vol. 44, 2015, p. 7342-7370.

WELTI, J.; VERGARA, F. Atividade de água / Conceito y aplicación em alimentos com alto contenido de humedad. In: AGUILERA, J.M. **Temas em Tecnologia de Alimentos**. Santiago de Chile: Universidad de Santiago de Chile, p.11-26, 1997.

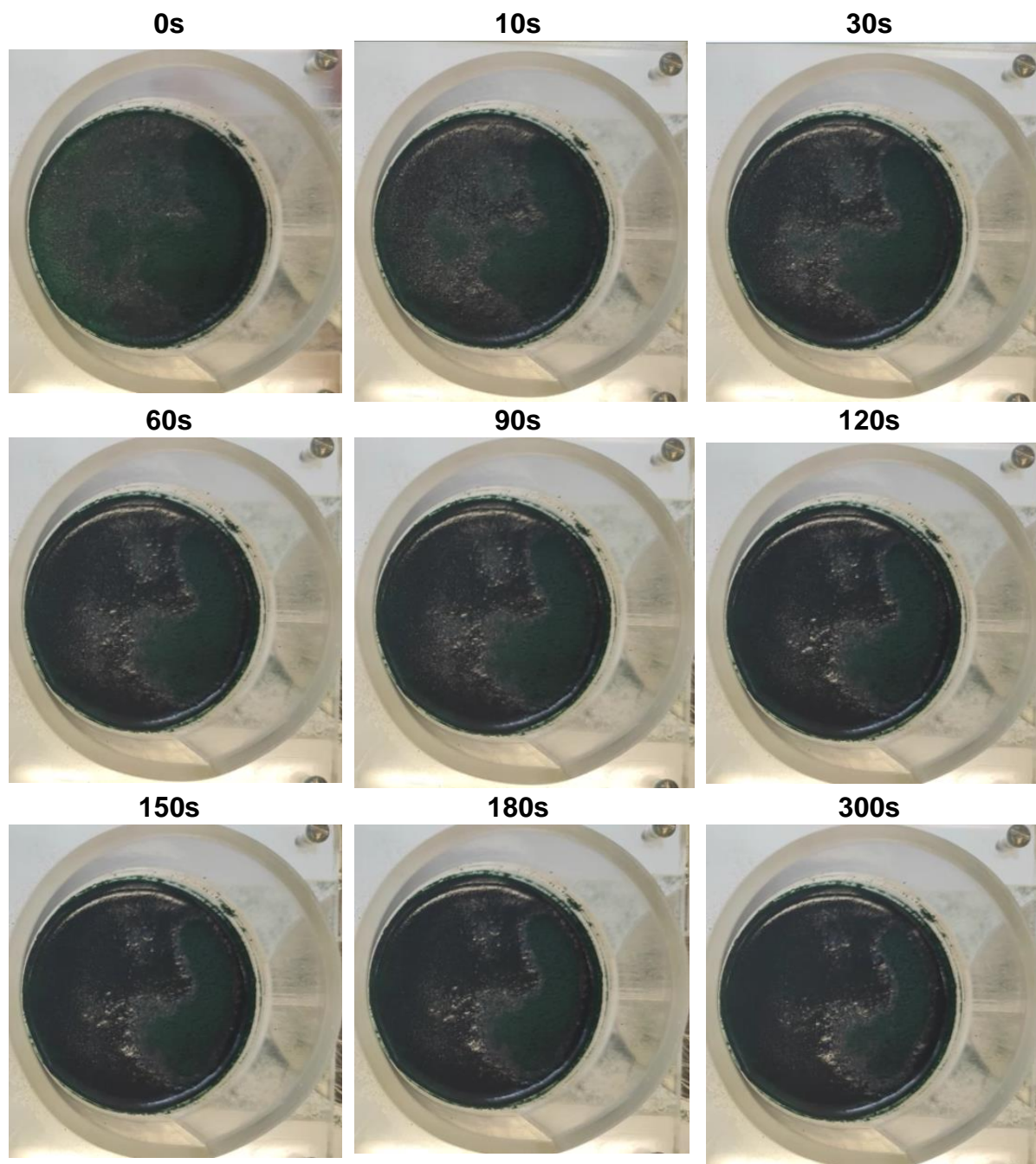
WU, S.; FITZPATRICK, J.; CRONIN, K.; MAIDANNYK, V.; MIAO, S. Effects of spraying surfactants in a fluidised bed on the rehydration behaviour of milk protein isolate powder. **Journal of Food Engineering**, 266:109694, 2020.

YANG, Z.; XU, B.; LIU, J.; ZHAN, J.; SONG, L. Dynamic changes of growth and physiological parameters of *Spirulina* cultivated outdoors—a case study in *Spirulina* Industrial Park in Inner Mongolia, China. **J Appl Phycol**, 34, p. 1163-1175, 2022.

ZAFAR, U.; HARE, C.; CALVERT, G.; GHADIRI, M.; GIRIMONTE, R.; FORMISANI, B.; QUINTANILLA, M. A. S.; VALVERDE, J. M. Comparison of cohesive powder flowability measured by Schulze Shear Cell, Raining Bed Method, Sevilla Powder Tester and new Ball Indentation Method. **Powder Technol.**, 286, p. 807-816, 2015.

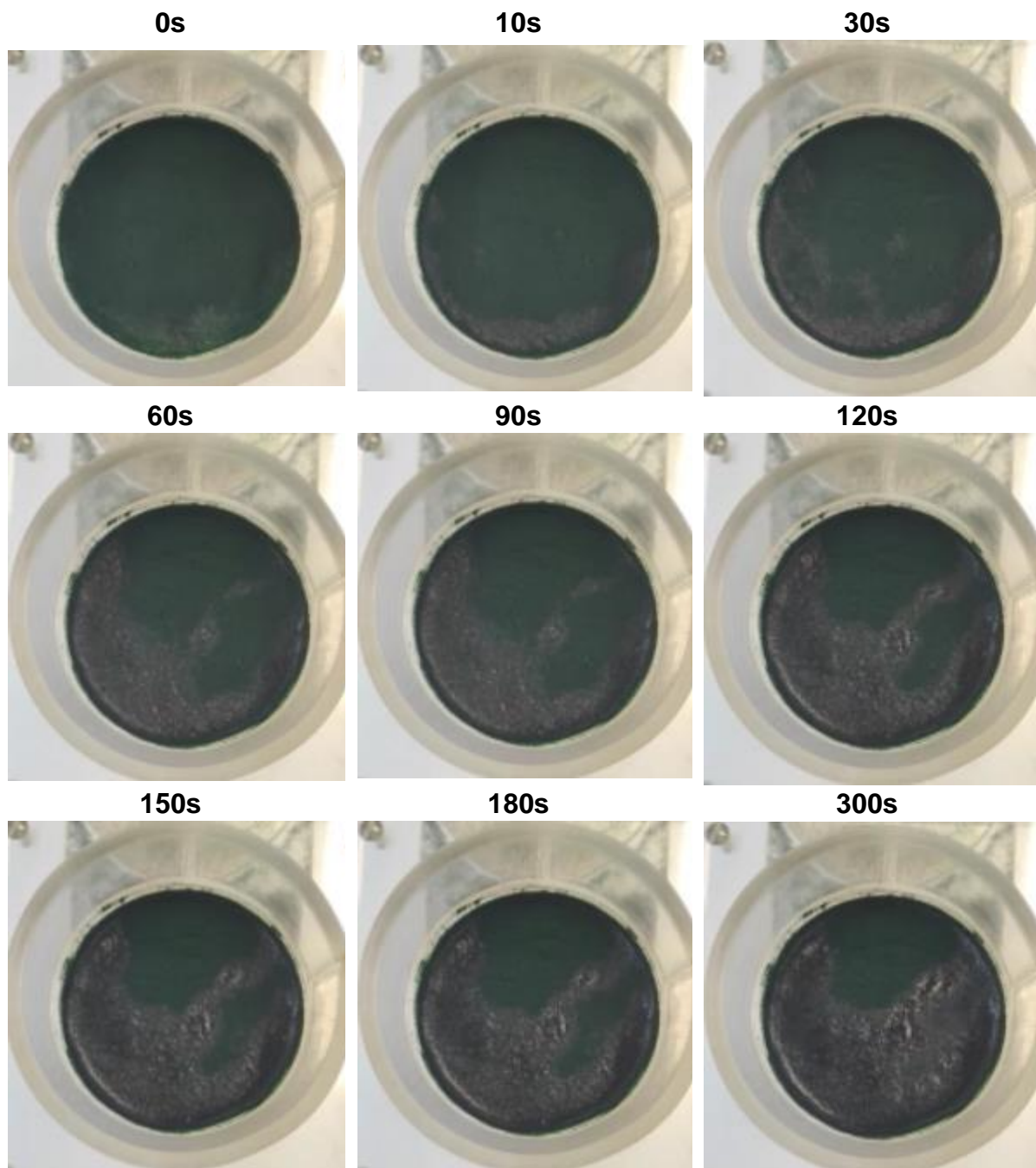
APÊNDICE A

Figura 16: Ensaio do tempo de instantaneização para a matéria-prima com aglomeração na condição de $T = 65^{\circ}\text{C}$ e $Q = 1,5 \text{ mL/min}$ (Ensaio 1).



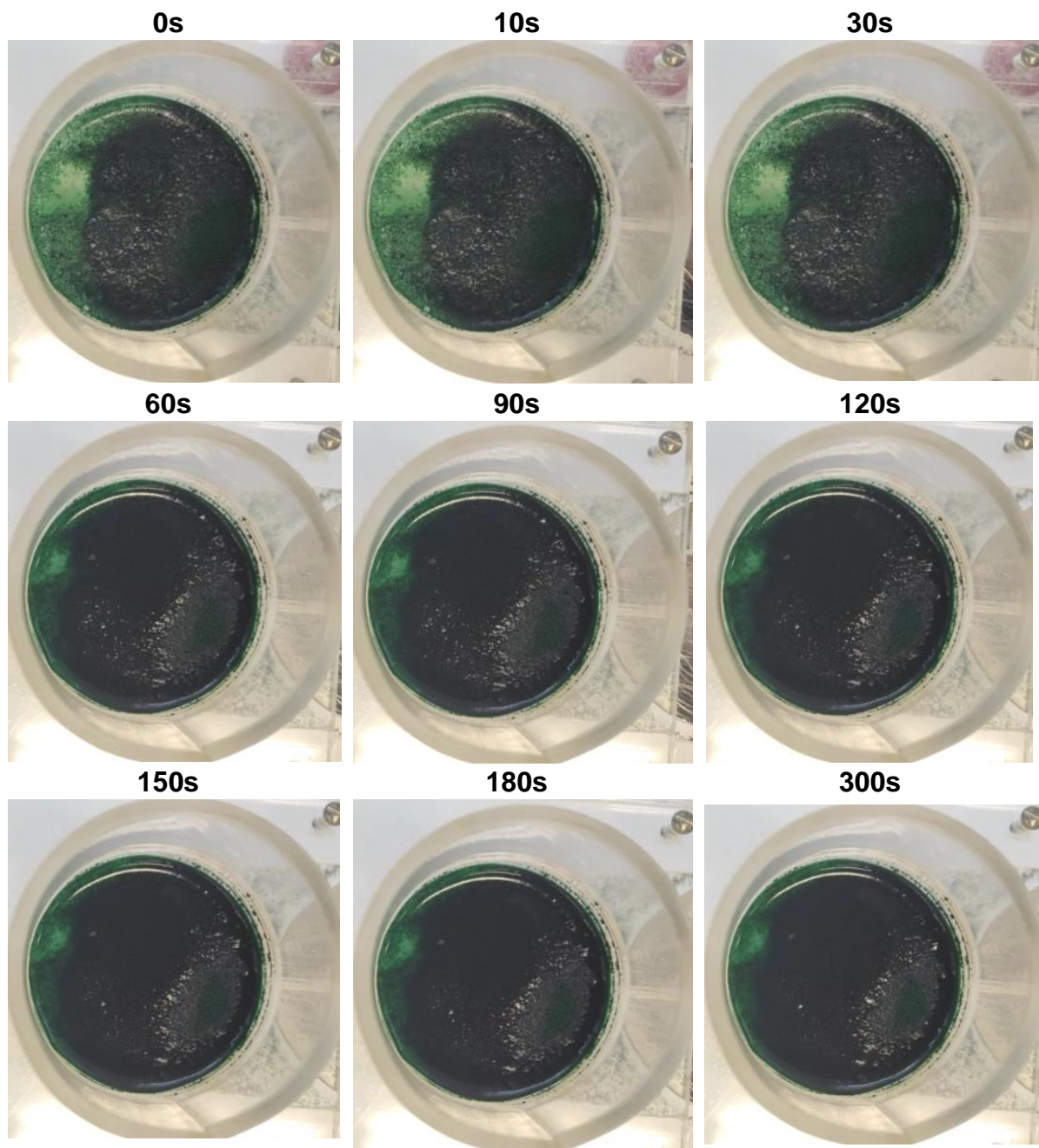
Fonte: Autor, 2023.

Figura 17: Ensaio do tempo de instantaneização para a matéria-prima com aglomeração na condição de $T = 85^{\circ}\text{C}$ e $Q = 1,5 \text{ mL/min}$ (Ensaio 2).



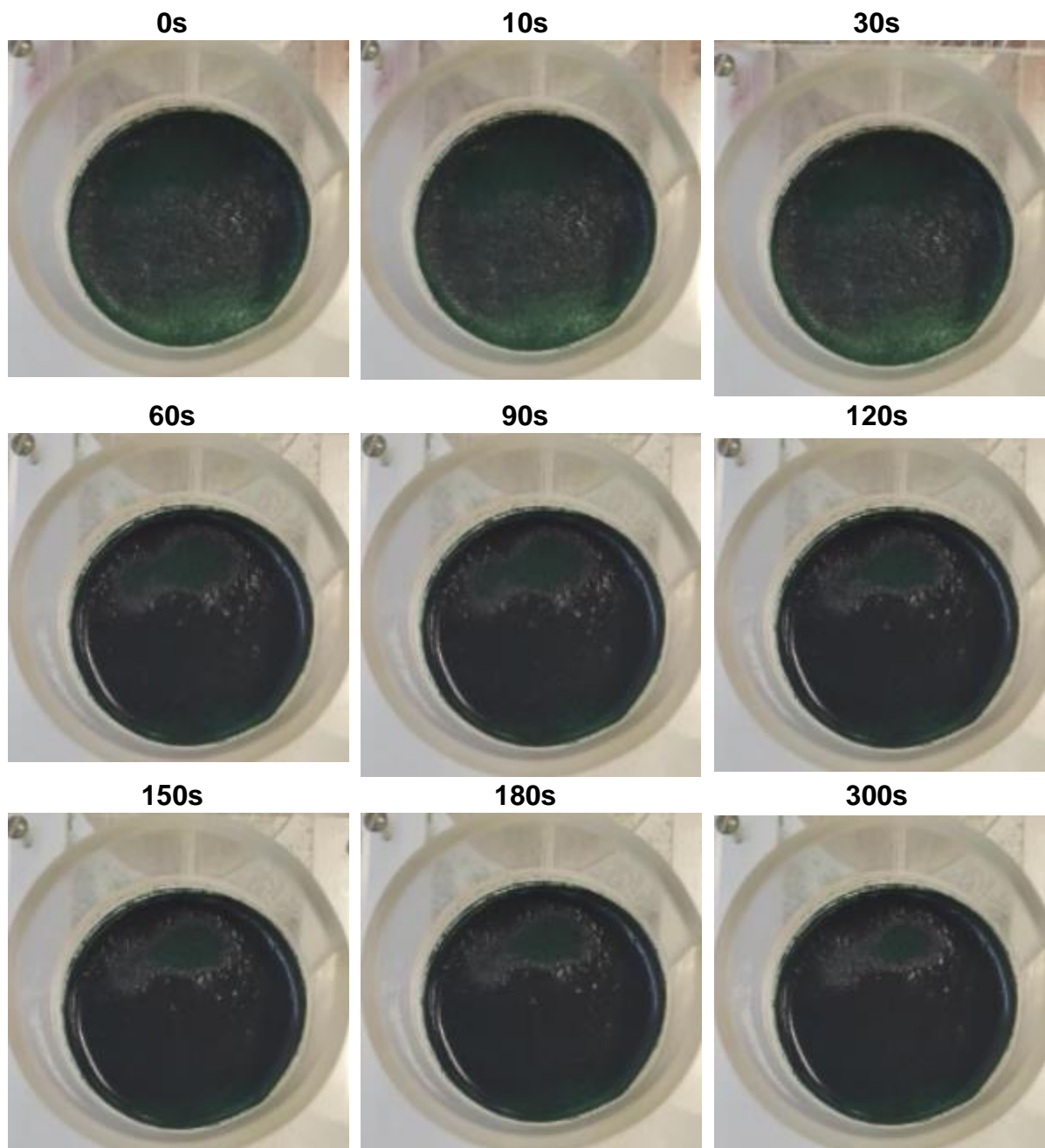
Fonte: Autor, 2023.

Figura 18: Ensaio do tempo de instantaneização para a matéria-prima com aglomeração na condição de $T = 65^{\circ}\text{C}$ e $Q = 2,5 \text{ mL/min}$ (Ensaio 3).



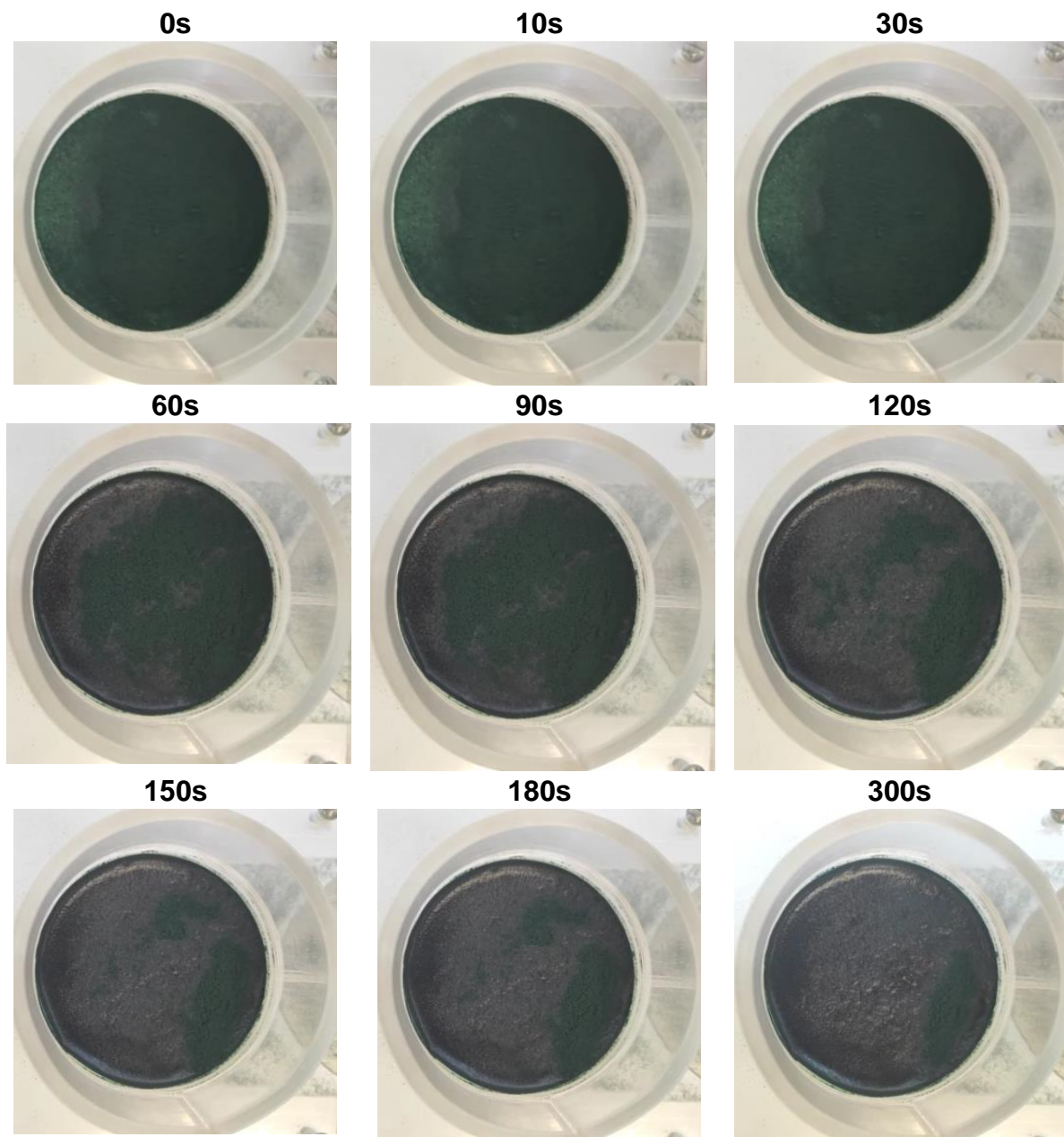
Fonte: Autor, 2023.

Figura 19: Ensaio do tempo de instantaneização para a matéria-prima com aglomeração na condição de $T = 85^{\circ}\text{C}$ e $Q = 2,5 \text{ mL/min}$ (Ensaio 4).



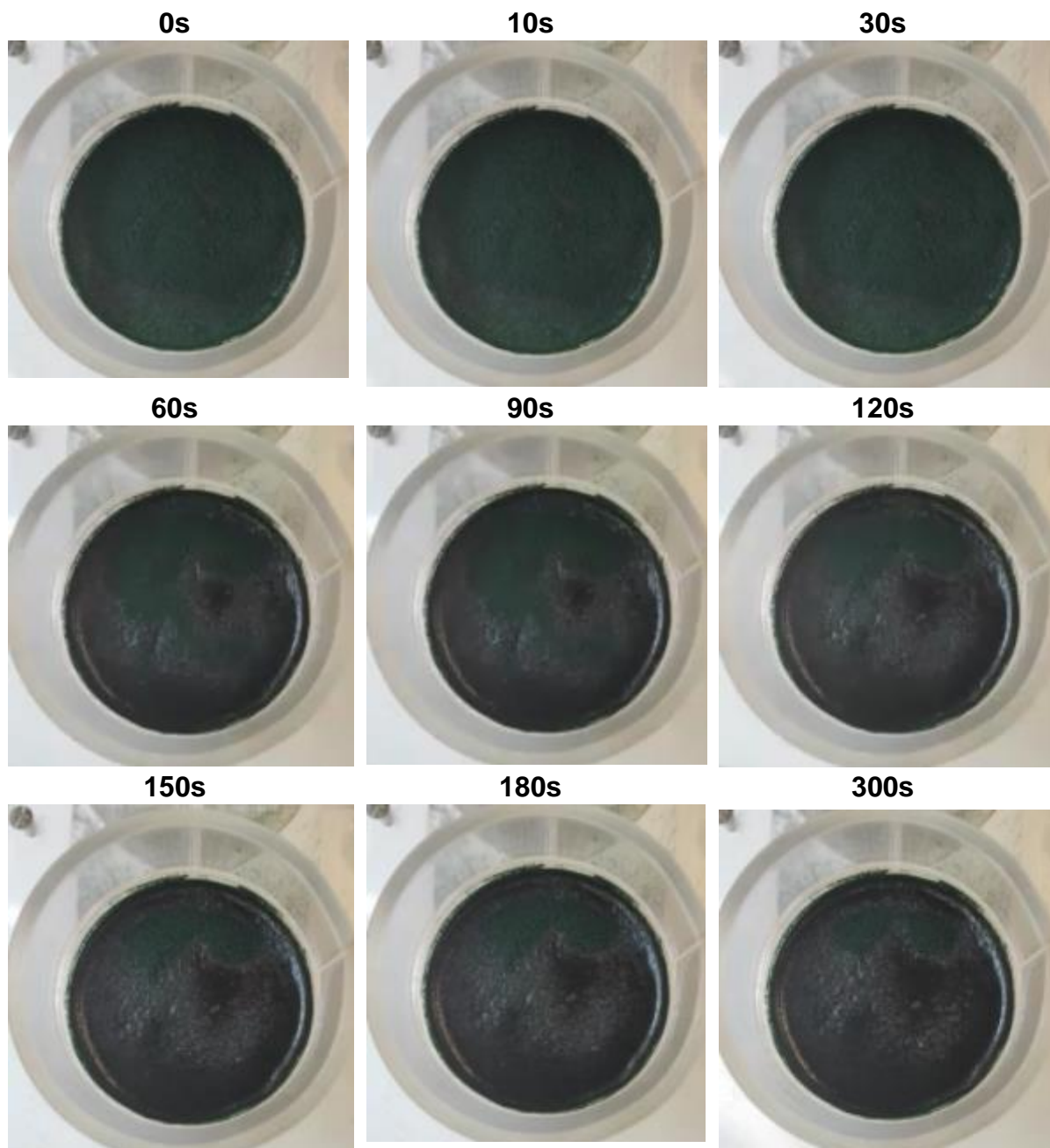
Fonte: Autor, 2023.

Figura 20: Ensaio do tempo de instantaneização para a matéria-prima com aglomeração na condição de (1) $T = 75^{\circ}\text{C}$ e $Q = 2,0 \text{ mL/min}$ (Ensaio 5).



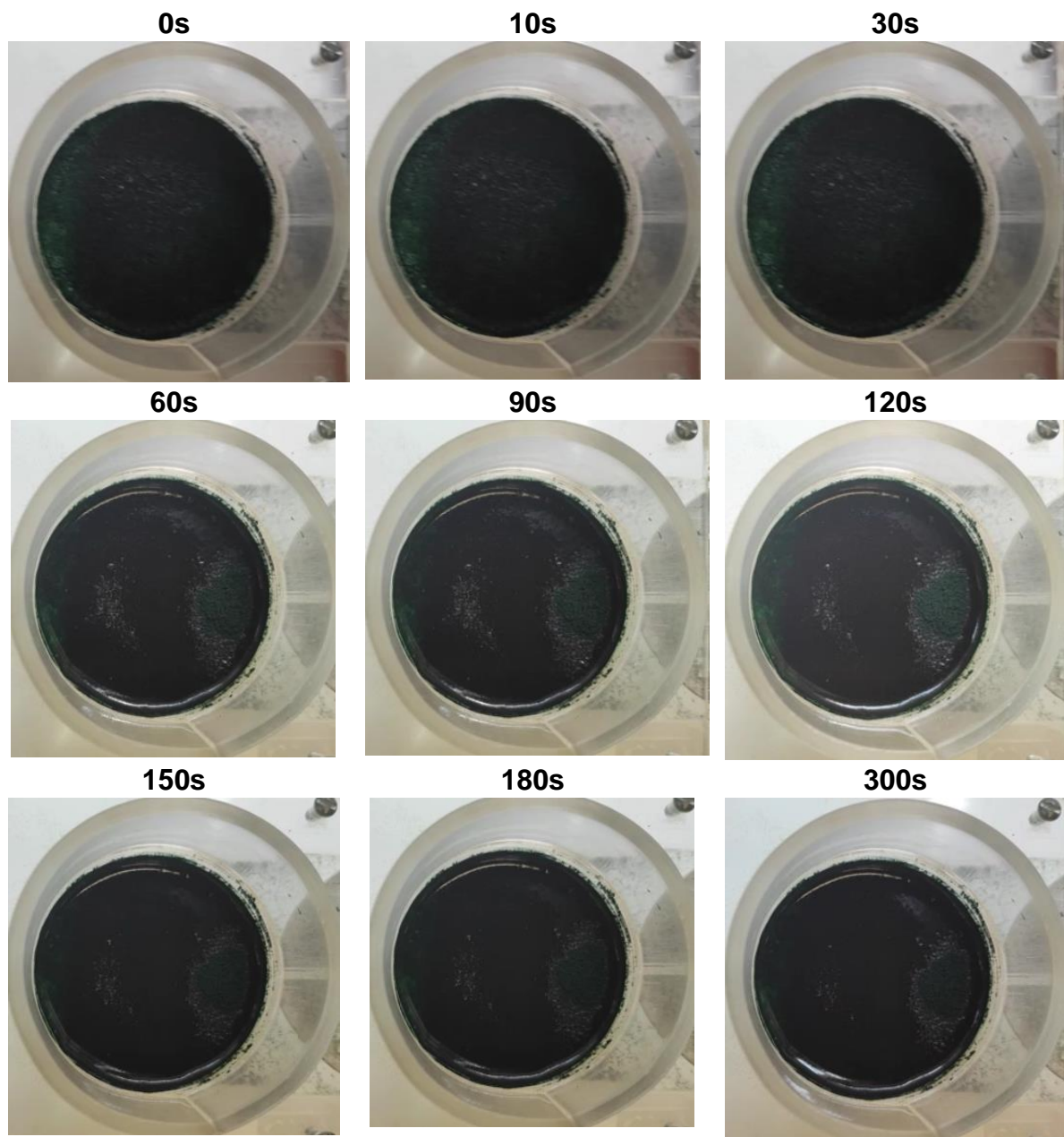
Fonte: Autor, 2023.

Figura 21: Ensaio do tempo de instantaneização para a matéria-prima com aglomeração na condição de (2) $T = 75^{\circ}\text{C}$ e $Q = 2,0 \text{ mL/min}$ (Ensaio 6).



Fonte: Autor, 2023.

Figura 22: Ensaio do tempo de instantaneização para a matéria-prima com aglomeração na condição de (3) $T = 75^{\circ}\text{C}$ e $Q = 2,0 \text{ mL/min}$ (Ensaio 7).



Fonte: Autor, 2023.