



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

Câmpus de São José do Rio Preto

João Pedro Cano

“Avaliação das características reológicas de cervejas tipo *american barleywine*  
produzidas com diferentes tempos de mosturação”

São José do Rio Preto

2023

João Pedro Cano

“Avaliação das características reológicas de cervejas tipo *american barleywine*  
produzidas com diferentes tempos de mosturação”

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia e Ciência de Alimentos (Área de concentração Ciência e Tecnologia de Alimentos), junto ao programa de pós-graduação em Engenharia e Ciência de alimentos, do Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Câmpus de São José do Rio Preto.

Financiadora: CAPES – Proc. 88887.606433/2021-00

Orientador: Prof. Dr. Javier Telis Romero

Coorientador: Prof. Dr. Vanildo Luiz Del Bianchi

Coorientador: Prof. Dr. Denis Cantu Lozano

São José do Rio Preto – SP

2023

C227a      Cano, João Pedro

            Avaliação das características reológicas de cervejas tipo american  
barleywine produzidas com diferentes tempos de mosturação / João Pedro  
Cano. -- São José do Rio Preto, 2023

            108 p. : il., tabs.

            Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto  
de Biociências Letras e Ciências Exatas, São José do Rio Preto

            Orientador: Javier Telis Romero

            Coorientador: Vanildo Luiz Del Bianchi

            1. Modelos matemáticos. 2. Reologia. 3. Viscosidade. 4. Newton. 5.  
Artesanal. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do Instituto de Biociências  
Letras e Ciências Exatas, São José do Rio Preto. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

João Pedro Cano

“Avaliação das características reológicas de cervejas tipo *american barleywine* produzidas com diferentes tempos de mosturação”

Dissertação apresentada ao Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Campus de São José do Rio Preto, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia e Ciência de Alimentos (Área de concentração Ciência e Tecnologia de Alimentos).

Comissão Examinadora

Prof. Dr. Javier Telis Romero  
Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – São José do Rio Preto/SP  
Orientador

Prof. Dr. Guilherme Lorencini Schuina  
IFRO – Ariquemes/RO

Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Maria Julia Neves Martins  
IFSP – Sertãozinho/SP

Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Lilian Fachin Leonardo Betiol  
UNESP – São José do Rio Preto/SP

Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Elisa Teshima  
UEFS – Feira de Santana - BA

São José do Rio Preto

15/08/2023

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de expressar minha mais profunda gratidão a todas as pessoas que me auxiliaram, direta ou indiretamente, na execução deste trabalho. Um reconhecimento especial se faz necessário para:

Meus pais e a meu irmão, por seu constante incentivo, compreensão durante este período desafiador e apoio inabalável em cada passo da minha jornada acadêmica, profissional e principalmente pessoal.

À minha amada namorada, cuja paciência, motivação e amor incondicional foram um farol de força e me mantiveram equilibrado ao longo do processo.

Sem todos vocês, este trabalho não teria sido possível. Agradeço do fundo do meu coração.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Javier Telis Romero e coorientadores Prof. Dr. Vanildo Luiz Del Bianchi e Dr. Denis Cantu Lozano pela sugestão do tema, bem como pela disponibilidade, orientação, conhecimentos transmitidos, esclarecimentos e apoio na realização deste trabalho;

Aos meus professores, colegas e aqueles que me deram a oportunidade de aprender ao seu lado.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, à qual agradeço.

## RESUMO

A cerveja é uma das bebidas alcoólicas mais consumida em todo o mundo, enquanto o Brasil é o terceiro maior consumidor e produtor dessa bebida. Na sua fabricação são utilizadas diferentes operações unitárias que requerem um melhor conhecimento das propriedades reológicas para entender as transformações que ocorrem no fluido, principalmente sobre a viscosidade. A viscosidade é a propriedade física que caracteriza a resistência de um fluido ao escoamento, portanto, é uma das propriedades físicas de grande interesse da indústria. O principal estilo de cerveja consumida no mundo, é a cervejas da família lager, no geral produzidas em indústrias em larga escala e na apresentação Pilsen. Porém, no cenário atual do setor cervejeiro, percebe-se que a produção artesanal de cerveja obteve um grande crescimento e, nesse meio, as cervejas da família ale, que são cervejas de alta fermentação, tem se destacado por caracterizar cervejas com gostos, aromas e cores diferentes das cervejas tradicionais, devido a sua alta concentração de lúpulo e outros ingredientes. Portanto, o objetivo desta pesquisa foi determinar as propriedades reológicas e estudar modelos matemáticos para compreender essas propriedades em diferentes temperaturas e tempos de mosturações do mosto cervejeiro da *American Barleywine*, uma cerveja da família ale. Para isso, as cervejas foram produzidas com três tipos de mosturação: elevada com 30 minutos de mosturação a 60 °C e 60 min. de sacarificação a 70 °C; a padrão com 60 min. de mosturação e 30 min. de sacarificação; e a mosturação reduzida com um processo de 60 min. no total. A viscosidade do mosto e do produto final foi estudada sob uma taxa de deformação que variou entre 1,0 e 500,0 s<sup>-1</sup>, onde os resultados foram modelados matematicamente pelas equações de: Newton, Ostwald-de-Waele, Bingham e Herschel-Bulkley, para determinar a natureza do fluido. A viscosidade foi medida com o uso de um reômetro de cilindros concêntricos. Os experimentos foram realizados em duplicata e os modelos foram ajustados utilizando o software Statistica, e avaliados pelo coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>). A partir dos resultados foi verificado que o mosto e a cerveja final apresentam comportamento newtoniano quando em baixas temperaturas (10 e 25 °C), a partir disso o comportamento dos fluidos estudados mudou para dilatante. Foi observado também que a tensão e a viscosidade diminuíram com o aumento da temperatura. Maiores tensões foram necessárias quando em menores temperaturas. O modelo que melhor se ajustou aos parâmetros estudados tanto para o mosto quanto para o produto final foi o de Herschel-Bulkley, com exceção do mosto produzido por mosturação padrão em que o melhor modelo predito foi o de Ostwald-de-Waele. Espera-se contribuir para o estudo reológico de cervejas

artesanais do estilo ale em especial para cervejas com elevada graduação alcoólica e elevado corpo, como a *American Barleywine*.

**PALAVRAS-CHAVE:** Modelos matemáticos. Reologia. Viscosidade. Newton. Artesanal.

## ABSTRACT

Beer is one of the most consumed alcoholic beverages worldwide, with Brazil ranking as the third largest consumer and producer of this beverage. Its manufacturing process involves different unit operations that require a better understanding of rheological properties to understand the transformations that occur in the fluid, particularly regarding viscosity. Viscosity is the physical property that characterizes a fluid's resistance to flow, hence, it is one of the physical properties of greatest interest to the industry. The main style of beer consumed worldwide is lager, typically produced in large-scale industries and in the Pilsen presentation. However, in the current beer industry landscape, it's noticeable that craft beer production has seen significant growth, and within this sector, ales, which are top-fermented beers, have stood out due to their unique tastes, aromas, and colors different from traditional beers, due to their high concentration of hops and other ingredients. Therefore, the aim of this research was to determine the rheological properties and to study mathematical models to understand these properties at different temperatures and mashing times of the wort from American Barleywine, an ale. For this purpose, beers were produced with three types of mashing: reduced with 45 minutes of mashing at 60 °C followed by 15 min. of saccharification at 70 °C; standard with 60 min. of mashing and 30 min. of saccharification, and reduced mashing with 30 min. Of mashing followed by 60 min. of saccharification. The viscosity of the wort and the final product was studied at a shear rate that varied between 1.0 and 500.0 s<sup>-1</sup>, where the results were mathematically modeled by the equations of: Newton, Ostwald-de-Waele, Bingham, and Herschel-Bulkley, to determine the nature of the fluid. Viscosity was measured using a concentric cylinder rheometer. The experiments were carried out in duplicate and the models were adjusted using the Statistica software, and evaluated by the coefficient of determination (R<sup>2</sup>). From the results, it was found that the wort and the final beer exhibit Newtonian behavior at low temperatures (10 and 25 °C), from which the behavior of the fluids studied changed to dilatant. It was also observed that the tension and viscosity decreased with increasing temperature. Higher tensions were required at lower temperatures. The model that best fit the parameters studied both for the wort and for the final product was the Herschel-Bulkley, with the exception of the wort produced by standard mashing where the best predicted model was the Ostwald-de-Waele. From these results, it is hoped to contribute to the rheological study of craft ales, particularly those with high alcohol content and full-bodied, like the American Barleywine.

**KEYWORDS:** Mathematical models. Rheology. Viscosity. Newton. Artisanal.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Classificação de cor nas escalas SRM e EBC.

Figura 2 – Malte de cevada: Malte pilsen - Agrária (nacional).

Figura 3 – Diferentes níveis de torra do malte.

Figura 4 – Esquema da flor fêmea do lúpulo (*Humulus lupulus* L.).

Figura 5 – Glândulas de lupulina fixadas nas brácteas das inflorescências de plantas de lúpulo.

Figura 6 – Estruturas químicas dos principais  $\alpha$ -ácidos e  $\beta$ -ácidos presentes no lúpulo.

Figura 7 – Estrutura dos produtos de isomerização da Humulona: cis-isohumulona e trans-isohumulona.

Figura 8 – Lúpulo Cascade em pellets.

Figura 9 – Fluxograma do processo de produção da cerveja.

Figura 10 – Classificação do comportamento reológico de fluidos.

Figura 11 – Reogramas e viscosidade aparente do comportamento de fluidos não newtonianos independentes do tempo.

Figura 12 – Processos de aquecimento e resfriamento durante a produção da cerveja A.

Figura 13 – Processos de aquecimento e resfriamento durante a produção da cerveja B.

Figura 14 – Processos de aquecimento e resfriamento durante a produção da cerveja C.

Figura 15 – Perfil sensorial quantitativo do lúpulo Columbus.

Figura 16 – Perfil sensorial quantitativo do lúpulo Amarillo.

Figura 17 – Perfil sensorial quantitativo do lúpulo Centennial.

Figura 18 – Comportamento reológico do mosto com a adição do lúpulo em função das diferentes temperaturas.

Figura 19 – Amostra de mosto pré-fervura, sem adição de lúpulo.

Figura 20 – Rampa de aquecimento com taxa de deformação fixa em  $100 \text{ (s}^{-1}\text{)}$ .

Figura 21 – Reogramas do comportamento do mosto e da cerveja de baixa mosturação tipo *Barleywine* em função das diferentes temperaturas testadas (10, 25, 50 e 80 °C).

Figura 22 – Reogramas do comportamento do mosto e da cerveja de mosturação padrão tipo *Barleywine* em função das diferentes temperaturas testadas (10, 25, 50 e 80 °C).

Figura 23 – Reogramas do comportamento do mosto e da cerveja de alta mosturação tipo *Barleywine* em função das diferentes temperaturas testadas (10, 25, 50 e 80 °C).

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características de classificação da cerveja e suas estatísticas.

Tabela 2 – Características vitais da cerveja *American Barleywine*.

Tabela 3 – Características da água para a produção de cerveja.

Tabela 4 – Principais constituintes da composição química do lúpulo em flor.

Tabela 5 – Atuação enzimática e suas condições ótimas de pH e temperatura.

Tabela 6 – Quantidade de açúcares para o *priming* em diferentes estilos de cerveja.

Tabela 7 – Amostras de mosto e da cerveja estilo Barleywine que foram selecionadas para as análises físico-químicas e reológicas.

Tabela 8 – Receita utilizada para a produção de 20 Litros das cervejas *American Barleywine*.

Tabela 9 – Tempos e temperaturas que foram seguidos para a realização da mosturação e sacarificação da cerveja *American Barleywine*.

Tabela 10 – Parâmetros de qualidade da água oriunda da rede pública da cidade de São José do Rio Preto no ano de 2022.

Tabela 11 – Propriedades e composição dos lúpulos Columbus, Amarillo e Centennial.

Tabela 12 – Modelos reológicos utilizados nos ajustes matemáticos.

Tabela 13 – Análises físico-químicas das Cervejas *Barleywine* com diferentes tipos de mosturação.

Tabela 14 – Ajustes no modelo matemático de Bingham.

Tabela 15 – Ajustes no modelo matemático Ostwald-de-Waele.

Tabela 16 – Ajustes no modelo matemático de Newton.

Tabela 17 – Comportamento da viscosidade expressa em Pa.s.

Tabela 18 – Média e desvio padrão do modelo de Arrhenius para os mostos sem lúpulo (antes da fervura) e com lúpulo (após a fervura).

Tabela 19 – Ajustes no modelo matemático de Newton para a cerveja de baixa mosturação.

Tabela 20 – Ajustes no modelo matemático Ostwald-de-Waele para a cerveja de baixa mosturação.

Tabela 21 – Ajustes no modelo matemático Herschel-Bulkley para a cerveja de baixa mosturação.

Tabela 22 – Ajustes no modelo matemático de Newton.

Tabela 23 – Ajustes no modelo matemático Ostwald-de-Waele para a cerveja de mosturação padrão.

Tabela 24 – Ajustes no modelo matemático Herschel-Bulkley para a cerveja de mosturação padrão.

Tabela 25 – Ajustes no modelo matemático de Newton.

Tabela 26 – Ajustes no modelo matemático Ostwald-de-Waele para a cerveja de alta mosturação.

Tabela 27 – Ajustes no modelo matemático Herschel-Bulkley para a cerveja de alta mosturação.

## **LISTA DE SIGLAS E ABREVIACÕES**

ABV – Alcohol By Volume (Álcool por Volume).

AOAC – Association of Official Analytical Chemists (Associação Oficial de Químicos Analíticos).

BJCP – Beer Judge Certification Program (Programa de

CERVBRASIL – Associação Brasileira da Indústria da Cerveja

EBC – European Brewing Convention (Convenção Europeia de Fabricação de Cerveja).

FG – Final Gravity (Densidade Final).

IBU – International Bitterness Unit (Unidade Internacional de Amargor).

OG – Original Gravity (Densidade Original).

SRM – Standard Reference Method (Método de Referência).

## Sumário

|                                                                           |           |
|---------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. INTRODUÇÃO.....</b>                                                 | <b>15</b> |
| 1.1. Objetivo geral .....                                                 | 18        |
| 1.2. Objetivos específicos .....                                          | 18        |
| <b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>                                     | <b>18</b> |
| 2.1. Contexto histórico da cerveja.....                                   | 18        |
| 2.2. Cerveja .....                                                        | 20        |
| 2.3. Classificação das cervejas (tipos de cervejas) .....                 | 21        |
| 2.4. Parâmetros da cerveja .....                                          | 23        |
| 2.4.1. Teor alcoólico .....                                               | 23        |
| 2.4.2. IBU .....                                                          | 24        |
| 2.4.3. EBC .....                                                          | 24        |
| 2.4.4. SRM.....                                                           | 25        |
| 2.5. Cerveja artesanal.....                                               | 25        |
| 2.6. American Barleywine.....                                             | 27        |
| 2.6.1. História da cerveja <i>American Barleywine</i> .....               | 28        |
| 2.6.2. Especificações da <i>American Barleywine</i> .....                 | 28        |
| 2.7. Matérias-Primas: principais insumos para fabricação de cerveja ..... | 29        |
| 2.7.1. Água.....                                                          | 29        |
| 2.7.2. Malte de cevada .....                                              | 31        |
| 2.7.3. Lúpulo ( <i>Humulus lupulus</i> L.) .....                          | 33        |
| 2.7.4. Levedura .....                                                     | 38        |
| 2.7.5. Especiarias e adjuntos.....                                        | 39        |
| 2.8. Processamento .....                                                  | 39        |
| 2.8.1. Processo de produção de cerveja .....                              | 39        |
| 2.8.2. Brassagem.....                                                     | 40        |
| 2.8.3. Fervura.....                                                       | 45        |
| 2.8.4. Whirlpool.....                                                     | 46        |
| 2.8.5. Oxigenação ou aeração .....                                        | 47        |
| 2.8.6. Resfriamento.....                                                  | 47        |
| 2.8.7. Fermentação.....                                                   | 47        |
| 2.8.8. Acabamento .....                                                   | 49        |
| 2.9. Reologia de fluidos alimentícios .....                               | 51        |
| <b>3. MATERIAL E MÉTODOS .....</b>                                        | <b>57</b> |
| 3.1. Local da pesquisa .....                                              | 57        |

|        |                                                                                              |           |
|--------|----------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.2.   | <b>Amostragem.....</b>                                                                       | <b>58</b> |
| 3.3.   | <b>Equipamentos .....</b>                                                                    | <b>58</b> |
| 3.4.   | <b>Receita da cerveja <i>American Barleywine</i> e suas variações.....</b>                   | <b>59</b> |
| 3.4.1. | Receita base .....                                                                           | 59        |
| 3.4.2. | Variações na produção (mosturação) .....                                                     | 60        |
| 3.5.   | <b>Matérias-primas cervejeiras.....</b>                                                      | <b>62</b> |
| 3.5.1. | Água.....                                                                                    | 62        |
| 3.5.2. | Malte de cevada .....                                                                        | 63        |
| 3.5.3. | Lúpulo.....                                                                                  | 63        |
| 3.5.4. | Levedura .....                                                                               | 65        |
| 3.6.   | <b>Procedimento experimental.....</b>                                                        | <b>65</b> |
| 3.6.1. | Brassagem.....                                                                               | 66        |
| 3.7.   | <b>Determinações analíticas .....</b>                                                        | <b>69</b> |
| 3.7.1. | Medidas reológicas .....                                                                     | 69        |
| 3.8.   | <b>Métodos analíticos.....</b>                                                               | <b>70</b> |
| 3.8.1. | Determinação do pH.....                                                                      | 70        |
| 3.8.2. | Cor .....                                                                                    | 70        |
| 3.8.3. | Álcool (%) .....                                                                             | 70        |
| 3.8.4. | Teor de compostos fenólicos .....                                                            | 71        |
| 3.8.5. | °Brix .....                                                                                  | 71        |
| 3.8.6. | Amargor.....                                                                                 | 71        |
| 3.8.7. | Densidade Original e Final .....                                                             | 71        |
| 3.8.8. | Acidez Total Titulável .....                                                                 | 71        |
| 3.9.   | <b>Análise Estatística .....</b>                                                             | <b>72</b> |
| 4.     | <b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>                                                          | <b>72</b> |
| 4.1.   | <b>Análises físico-químicas das Cervejas finais produzidas no estilo <i>Barleywine</i> .</b> | <b>72</b> |
| 4.2.   | <b>Estudo reológico das cervejas.....</b>                                                    | <b>77</b> |
| 4.2.1. | Reologia da Cerveja 1.....                                                                   | 78        |
| 4.2.2. | Comportamento reológico das cervejas produzidas em diferentes tempos de mosturações .....    | 86        |
| 5.     | <b>CONCLUSÕES.....</b>                                                                       | <b>97</b> |
|        | <b>REFERÊNCIAS.....</b>                                                                      | <b>99</b> |

## **1. INTRODUÇÃO**

A cerveja é uma das bebidas mais antigas do mundo e é a bebida alcoólica mais consumida no Brasil, anualmente são produzidos mais de 14,1 bilhões de litros. O Brasil é o terceiro maior consumidor e produtor mundial de cerveja, fica atrás apenas da China e Estados Unidos segundo uma pesquisa publicada em 2020 pela Barth-Haas Group (maior fornecedor mundial de produtos e serviços de lúpulo) e pela CERVBRASIL (Associação Brasileira da Indústria da Cerveja) (BARTH-HAAS GROUP, 2020; CERVBRASIL, 2021).

A cerveja é obtida da fermentação do mosto de cevada maltada por ação de levedura, uma parte da cevada maltada pode ser substituída parcialmente por outro cereal (trigo, arroz, milho, entre outros) chamado de adjunto cervejeiro. De acordo com a sua forma de produção é dividida em dois grandes grupos ale (alta fermentação) e Lager (baixa fermentação) (VENTURINI FILHO, 2018; BRASIL, 2019).

O malte, principal matéria-prima para a produção de cerveja e é responsável pela textura, cor, aroma e sabor. Os cereais mais utilizados em escala industrial para a malteação dos seus grãos são apenas a cevada, o trigo e o centeio, devido a sua capacidade de desenvolvimento das enzimas alfa e beta-amilases durante a sua germinação (FLORES; WATANABE, 2014).

Nos últimos 40 anos, diante da busca insaciável do ser humano pela inovação e disseminação do conhecimento, é possível observar uma mudança no balanço da produção de cerveja, que antes era concentrada em grandes indústrias e atualmente entende-se que a produção artesanal está em crescimento acelerado. O consumidor está em constante busca por novidades, variações e até mesmo possui grande interesse em produzir sua própria cerveja (MATOS, 2011).

A cerveja artesanal, por ser produzida em menores escalas, possui em sua composição, ingredientes selecionados e sofisticados de uma enorme variedade, não comumente encontrados em cervejas industriais. Desse modo, o cervejeiro artesanal é capaz de atender um mercado mais restrito e exigente que preza pela qualidade e alta variedade de estilos (CERVBRASIL, 2021; MARCUSSO, 2015).

A produção de cerveja pode ser caracterizada e separada em duas grandes famílias: as lager e as ale, sendo elas de baixa e alta fermentação, respectivamente. As cervejas do tipo Lager são fermentadas por leveduras ativas em baixa temperatura entre 9 e 15 °C e as ales por leveduras que necessitam temperaturas altas entre 15 e 25 °C.

O presente trabalho visa estudar uma cerveja da família ale, a *American Barleywine*, que se encontra no grupo das American Strong ales. Seu nome seguindo uma tradução de forma literal é vinho de cevada, isso é devido ao seu alto teor alcoólico, próximo ao de vinhos, contudo como é feita a partir de grãos de malte ela é de fato uma cerveja.

Segundo BJCP (2021 Style Guidelines) a *American Barleywine* deve possuir um teor alcoólico de 8 a 12% em volume e deve ser produzida a partir de um mosto de alta densidade de 1.080 até 1.120 e é caracterizada pela sua alta concentração de lúpulo.

O processo clássico para a produção da cerveja pode ser dividido em duas etapas: 1) Brassagem e 2) fermentação. Em que a primeira etapa consiste na produção do mosto, onde existem as subetapas de moagem do cereal, mosturação e fervura do mosto, filtração/clarificação e resfriamento; A segunda etapa consiste de: fermentação e maturação, incluindo ainda filtração e clarificação (em processos industriais), carbonatação, pasteurização e envase (BETTENHAUSEN et al., 2018).

Durante o processo de maltagem o crescimento da semente deve ser mínimo, para evitar a perda de açúcares causada pelo seu crescimento e respiração. Ao mesmo tempo é maximizada a degradação do endosperma e a formação das enzimas. De modo geral a maltagem é uma hidratação controlada, seguida de germinação e secagem controlada das sementes (BOULTON; QUAIN, 2006).

Quando tratamos de cervejas artesanais, temos em seu processo de produção características únicas, trazidas por diversas formulações que contêm não apenas os ingredientes básicos de fabricação da cerveja industrial (água, malte, lúpulo e levedura), como também a adição de especiarias, como frutas, café, pimentas e até mesmo gengibre (Lemos, 2016).

O lúpulo é um dos principais diferenciais entre as cervejas industriais e artesanais, de modo que as receitas artesanais visam combinar uma maior variedade de espécies a fim de obter cervejas únicas e com sabores marcantes.

Esta planta, é uma trepadeira e suas inflorescências, possuem uma alta concentração de glândulas que secretam uma substância chamada de lupulina, um pó amarelado onde se encontram as substâncias químicas de interesse para a produção da cerveja (WANNENMACHER et al., 2018; TING; RYDER, 2017).

Essas secreções das flores do lúpulo são ricas em resinas (que conferem amargor), polifenóis (com propriedades antioxidantes), óleos essenciais (que conferem aroma) e

proteínas (RETTBERG; BIENDL; GARBE, 2018; HUGHES; BAXTER, 2001). De modo geral o lúpulo pode ser utilizado em forma de flores inteiras, extrato ou em pellets.

Nas etapas de produção de cerveja são empregadas várias operações unitárias que requerem o conhecimento da reologia e dinâmica dos fluidos como por exemplo, bombeamento, trocas de calor (aquecimento e resfriamento), sedimentação, misturadores, evaporadores, entre outros. Portanto, o conhecimento das propriedades reológicas do mosto é de extrema importância para a indústria cervejeira pois, durante o processo de transferências de calor a composição do mosto pode sofrer variações significativas, o que altera as suas propriedades físicas. A condutividade térmica, a densidade, a viscosidade e o calor específico são as propriedades físicas mais estudadas na troca térmica (KERN, 1987; TELIS-ROMERO; DITCHFIELD, 2016).

A reologia é a ciência que estuda a deformação e o escoamento da matéria, ou seja, é a forma com que os materiais respondem à aplicação de tensões ou deformações. O precursor sobre o estudo do comportamento reológico dos materiais foi Isaac Newton, que em 1687 demonstrou experimentalmente e matematicamente a definição de viscosidade como a resistência ao deslizamento de suas moléculas devido à fricção interna (BARNES; HUTTON, 1989; EVARISTO-FERREIRA et al., 2005). Embora date desta época, o conhecimento desta ciência difundiu-se apenas em 1929 com Eugene C. Bingham introduzindo a terminologia da palavra reologia como “tudo escoa” (STEFFE, 1996).

Portanto, os fluidos são divididos em duas categorias: newtonianos e não-newtonianos. Sua classificação ocorre por meio da análise da relação entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação para condições de temperatura e pressão estabelecidas (KERN, 1987; STEFFE, 1996).

Considerando a falta de informações publicadas sobre a reologia e a dinâmica de fluidos da cerveja do estilo *American Barleywine*, este trabalho tem como objetivo principal determinar as propriedades reológicas e desenvolver correlações simples para prever essas propriedades em diferentes temperaturas e concentrações do mosto maltado.

Pretende-se analisar a influência de diferentes tempos de mosturação e da concentração de lúpulo na reologia tanto do mosto cervejeiro quanto da cerveja como produto final.

### **1.1. Objetivo geral**

Produzir uma cerveja artesanal do tipo *American Barleywine* e estudar sua reologia, observando a influência de diferentes tempos de mosturação.

### **1.2. Objetivos específicos**

Produção de 04 cervejas do estilo *American Barleywine* com diferentes tempos de mosturação e uma cerveja controle produzida com o método de mosturação padrão para efeitos de comparação. Ainda, avaliar o efeito que o lúpulo teve durante a produção do mosto e no produto final da cerveja de mosturação padrão.

Este trabalho consiste em determinar as propriedades reológicas e desenvolver a aplicabilidade do modelo de Newton, de Ostwald-de-Waele e de Bingham no mosto maltado da cerveja *American Barleywine* em diferentes temperaturas e concentrações.

Determinar as propriedades reológicas e aplicabilidade de modelos matemáticos para prever essas propriedades em diferentes temperaturas e concentrações do mosto cervejeiro, para a caracterização reológica do fluido.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

A pesquisa teórica foi desenvolvida através de material bibliográfico, como livros, artigos, teses, dissertações e materiais disponíveis na internet (sites oficiais de informações sobre cervejas) sobre o objeto do estudo, em formato de pesquisa qualitativa.

### **2.1. Contexto histórico da cerveja**

Atualmente, com o amplo conhecimento sobre o processo de produção da cerveja, acredita-se que a invenção dessa bebida tenha sido ao acaso e descoberta acidentalmente através da fermentação espontânea da mistura de cereais. Esta hipótese é baseada no conhecimento do pão e de sua fermentação pelos povos antigos, que ainda tem grande semelhança com os insumos utilizados na atualidade (MORADO, 2017).

Ainda que sem exatidão, existem registros, anteriores à escrita, como desenhos rupestres e símbolos primitivos, que remetem à existência de uma bebida semelhante à cerveja, desde antes de Cristo (SOUZA; ANDRADE, 2017). Há cerca de 8 mil anos atrás, sumérios e

os assírios desenvolveram a arte da fabricação de cerveja, alcançando os povos da babilônia e os egípcios.

Por muito tempo durante a antiguidade a produção da cerveja era responsabilidade de padeiros, devido a sua relação com a panificação e semelhança em suas matérias primas: grãos de cereais e levedura. Suspeita-se que a descoberta da cerveja seja proveniente de um acidente, onde a cevada germinada e seca que seria utilizada na fabricação de pães, tenha entrado em contato com um líquido, sendo umedecida e fermentada espontaneamente. (MORADO, 2017).

Desde então, a tradição milenar de produção de cerveja vem se desenvolvendo e foi durante a idade média que o lúpulo foi introduzido pela primeira vez como matéria prima, conferindo as características básicas da cerveja atual (DRAGONE; ALMEIDA; SILVA, 2010). Nesta época, a técnica de produção de cerveja foi bastante difundida em mosteiros que empregavam ingredientes diversos como alecrim, louro, sálvia e gengibre, com a finalidade de aromatizá-la, além de variar a proporção entre os ingredientes principais (água, malte, lúpulo e leveduras) resultando em diferentes tipos de cerveja (BITU, 2009).

A cerveja chegou ao Brasil através da família real Portuguesa trazida por D. João VI no início do século XIX durante a sua permanência em território brasileiro. Ainda sem produção nacional, a cerveja daquela época era importada de países europeus (VENTURINI FILHO e CEREDA, 2001).

Ao mesmo passo que a bebida chegou ao Brasil em 1808 junto com os colonizadores, segundo Santos (2003), o primeiro documento conhecido em relação à cerveja brasileira é um anúncio de venda publicado no Jornal do Comércio do Rio de Janeiro de 27 de outubro de 1836. Nessa época, a bebida alcoólica mais popular no país era a cachaça e a cerveja era produzida de maneira caseira em pequenas escalas, principalmente para o consumo dos próprios estrangeiros e era considerada uma atividade culinária que as mulheres que as realizavam (MORADO, 2017).

O desenvolvimento da indústria cervejeira no Brasil foi notável a partir da década de 1860, momento em que ocorreu um aumento significativo da produção até a primeira guerra mundial, foi um período que existia grande dificuldade da obtenção de malte e lúpulo importados da Europa, principalmente da Alemanha e Áustria (SANTOS, 2003).

As primeiras grandes cervejarias surgiram entre 1870 e 1880, coincidindo com o início do processo da industrialização. Segundo Silva, Leite e Paula (2016) com o surgimento das primeiras máquinas compressoras frigoríficas, possibilitando a obtenção de gelo, nos estados

de São Paulo e Rio de Janeiro, as cervejarias alcançaram um maior controle de temperatura no processo de fermentação, possibilitando uma expansão de suas fábricas.

Em 1888 na cidade do Rio de Janeiro foi fundada a “Manufatura de Cerveja Brahma Villiger & Cia” e poucos anos depois, em 1891 na cidade de São Paulo, a “Companhia Antártica Paulista” (DRAGONE; ALMEIDA; SILVA, 2010). No ano de 2000 as empresas Brahma e Antártica se fundiram originando a AMBEV, se tornando a maior empresa cervejeira do Brasil. Posteriormente em 2004 associou-se com a cervejaria InterBrew de origem Belga, agora originando a INBEV e se tornando o maior conglomerado cervejeiro do mundo (ALMEIDA E SILVA, 2005).

Em 2018 o Brasil atingiu a marca de 889 cervejarias, com 210 novas cervejarias. Estima-se que a cada dois dias uma cervejaria era inaugurada no país. Em 2019, foram mais 320 novos registros, praticamente um novo estabelecimento por dia. Já em 2020 foi alcançado o número de 1.383, com o registro de 204 novas cervejarias. Este foi o ano em que todos os estados do país passaram a possuir pelo menos uma cervejaria, com a abertura da primeira cervejaria do Acre (MAPA, 2019).

De acordo com a CervBrasil (Associação Brasileira da Indústria da Cerveja), em 2021 a produção nacional foi de aproximadamente 14 bilhões de litros no ano, representando 1,6% do Produto Interno Bruto (PIB), com faturamento de R\$ 100 bilhões/ano e a geração de 2,7 milhões de empregos (CERVBRASIL, 2021).

## **2.2. Cerveja**

A cerveja é uma bebida alcoólica produzida pela fermentação de cereais a partir de leveduras. Para a produção de cerveja são necessárias várias etapas, que vão desde a recepção de matéria-prima, com posterior produção do mosto e pôr fim a fermentação do mesmo (BARREIRO, 2016).

A Instrução Normativa nº 65, de 10 de dezembro de 2019 estabelece que são ingredientes obrigatórios da cerveja (BRASIL, 2019):

I - Água potável, conforme estabelecido em legislação específica do Ministério da Saúde;

II - Malte ou seu extrato, conforme definição do art. 4º, exceto para as bebidas definidas no art.10, incisos III e IV;

III - Lúpulo ou seu extrato, conforme definição do art. 8º, exceto para a "cerveja gruit".

Atualmente existem quatro escolas cervejeiras: a alemã, a belga, a inglesa e a americana. Cada uma é caracterizada por seu estilo específico.

A escola alemã tem como atributo principal a forte presença do malte com pouca presença do lúpulo, sempre respeitando a Lei da Pureza Alemã, que estabelece o uso de apenas quatro ingredientes: água, malte, lúpulo e levedura. Sendo ainda, permitido a combinação de cereais maltados como o trigo, milho, arroz, aveia, sorgo, entre outros. A maioria das cervejas desta escola é de fermentação Lager, sendo cervejas mais leves e menos amargas (MORADO, 2017).

A Belga, ao contrário da alemã, usa da complexidade da fermentação e dos maltes e utiliza de diversas especiarias, criando cervejas mais frutadas com aromas e sabores marcantes. A escola Inglesa por sua vez, apresenta uma enorme diversidade de estilos, mais amargos que o normal, outras envelhecidas em carvalho, assim como versões favorecendo o uso de maltes torrados (MORADO, 2017).

A americana é a escola que está ganhando um maior espaço no mercado devido as suas versões inovadoras a partir de outras escolas, dos cultivos de lúpulo doméstico, das novas técnicas de produção e por seus estilos extremos, abusando das quantidades de malte e lúpulo (SANTOS, 2014).

A fim de facilitar a identificação e classificação destas tão variadas cervejas, existem dois manuais que são conhecidos mundialmente: o Beer Judge Certification Program, Style Guidelines – BJCP e o Brewers Association. Ambos se baseiam nas principais escolas cervejeiras e consideram características como aparência, aroma, paladar, flavor, entre outros atributos mais técnicos.

### **2.3. Classificação das cervejas (tipos de cervejas)**

Estima-se que atualmente exista uma enorme variedade de cervejas, podendo extrapolar 20 mil tipos de formulações diferentes. Essa enorme variedade é consequência de pequenas mudanças no processo de fabricação, envolvendo variáveis como diferentes tempos e temperaturas de cozimento, fermentação e maturação e o uso de outros ingredientes além dos quatro básicos: água, lúpulo, cevada e malte, como trigo, milho, centeio, arroz, mel, mandioca, frutas e outros (SOARES, 2011).

Segundo Deliberalli (2015), as cervejas podem ser classificadas por cinco características básicas:

- Cor, variando de clara até escura conforme o grau de torra do malte;
- Teor alcoólico, que varia com o teor de açúcares fermentescíveis;
- Proporção de malte de cevada e trigo sua composição;
- Teor de extrato primitivo, que é a densidade original do mosto antes de ser fermentado, podendo ser entre leve, comum, extra e forte;
- Tipo de fermentação, que pode ser alta, baixa e espontânea.

A Tabela 1, apresenta essas características de classificação e suas estatísticas.

Tabela 1 – Características de classificação da cerveja e suas estatísticas.

|                                    |                                            |
|------------------------------------|--------------------------------------------|
| <b>1 - Cor</b>                     |                                            |
| Clara                              | Menos de 10 unidades EBC                   |
| Escura                             | 35 ou mais unidades EBC                    |
| <b>2 - Teor alcoólico</b>          |                                            |
| Sem álcool                         | Menos de 0,5% em volume de etanol          |
| Baixo Teor alcoólico               | Entre 0,5 e 2,0%                           |
| Alcoólica                          | Igual ou maior de 0,5% em volume de etanol |
| <b>3 - Extrato primitivo</b>       |                                            |
| Leve                               | acima de 0,5% até 10,0% em massa           |
| Comum                              | acima de 10,0% até 12,0% em massa          |
| Extra                              | acima de 12,0% até 14,0% em massa          |
| Forte                              | acima de 14,0% em massa                    |
| <b>4 - Teor de extrato (final)</b> |                                            |
| Baixo                              | até 1,20% em massa                         |
| Médio                              | 2,0% a 7,0% em massa                       |
| Alto                               | mais de 7,0% em massa                      |
| <b>5 - Fermentação</b>             |                                            |
| Alta                               | 15°C - 24°C                                |
| Baixa                              | 7°C - 12°C                                 |

Fonte: Adaptado de ROSA; AFONSO, 2015.

A maioria das cervejas são claras e de baixa fermentação, ou seja, o malte é menos torrado e quando expostas a temperaturas entre 6 °C e 15 °C, o levedo fica depositado no fundo do tanque, esse estilo é conhecido como “Lager”. O principal tipo de “Lager” e a mais consumida mundialmente é a cerveja Pilsen, (AQUARONE et al., 2001; SINDICERV, 2017).

## **2.4. Parâmetros da cerveja**

### **2.4.1. Teor alcoólico**

O teor alcoólico, também conhecido como alcohol by volume (ABV), é gerado a partir da conversão de açúcares fermentescíveis presentes inicialmente no mosto pela fermentação. A gravidade original (OG) subtraída da gravidade final (GF) fornecerá um valor que indica a quantidade de açúcares fermentescíveis que foram consumidos (BAMFORTH, 2011).

Segundo Parks (2011) o valor médio do teor alcoólico da maioria das cervejas é entre 4.5% e 5.2%. No entanto, existem muitas cervejas no mercado com teor alcoólico abaixo de 3.5% e outras que podem atingir acima de 12%. Existem técnicas especiais de fermentação que podem produzir cervejas com baixos e alto teores alcoólicos.

As cervejas podem também ser classificadas quanto ao teor alcoólico, essa classificação é realizada através da medida da porcentagem de álcool existente na cerveja, e as classes são:

- Cerveja sem álcool: conteúdo em álcool < 0,5% em volume;
- Cerveja com álcool: conteúdo em álcool > 0,5% em volume;
- Cerveja de baixo teor alcoólico: entre 0,5 até 2,0% de álcool;
- Cerveja de médio teor alcoólico: entre 2,0 até 4,5% de álcool;
- Cerveja de alto teor alcoólico: a partir de 4,5% de álcool.

Teoricamente, uma cerveja classificada como sem álcool não deveria conter nenhuma quantidade de etanol. Entretanto, existe um pequeno teor de álcool remanescente, que depende das legislações próprias dos vários países produtores. Não é considerada obrigatória a declaração, no rótulo do conteúdo alcoólico, quando o teor for menor ou igual a 0,5% em volume. (BRASIL, 2009). No Brasil, uma bebida pode ser considerada sem álcool se tiver graduação alcoólica até 0,5% em volume a 20°C, de acordo com a Instrução Normativa nº 65, de 18 de julho de 2000, do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. A legislação brasileira não faz uma distinção clara entre "baixo teor alcoólico" e "alto teor alcoólico".

#### 2.4.2. IBU

O IBU (*international Bitterness Unit*) é o padrão internacionalmente aceito para medir o amargor da cerveja. Segundo Philliskirk (2011) o método foi desenvolvido na década de 60 quando a maioria das cervejarias utilizava lúpulos embalados sem refrigeração, no qual se perdia entre 40 e 80% do seu amargor oriundo dos alfas ácidos. Os valores de IBU são uma importante medida da qualidade da cerveja.

Os valores de IBU fornecem informações sobre a intensidade do amargor da bebida. As cervejas podem variar de 1 a cerca de 100 IBU's. A medição do valor do IBU da cerveja requer técnicas laboratoriais complexas, como espectrofotometria e cromatografia líquida de alta pressão (OLIVER, 2011). Os valores entre 10 e 15 indicam pouco amargas; acima de 40 IBU é uma cerveja forte e a partir de 60, possui um forte amargor.

#### 2.4.3. EBC

A EBC (*European Brewing Convention*), é o método de avaliação de cor de cervejas utilizado mundialmente. O índice também é utilizado para medir a turbidez da cerveja. Antigamente a cor da cerveja era estimada qualitativamente, comparando os estilos da bebida. O método EBC é quantitativo e envolve medir a cor da amostra em espectrofotômetro (KISSMEYER, 2011).

A cor está diretamente ligada ao estilo da cerveja, basicamente definida pela sua receita. Existem duas escalas que são utilizadas para medir a cor das cervejas que são a EBC, europeia, e a SRM (*Standard Reference Method*), americana. A escala EBC classifica como cerveja clara a que tiver a cor com menos de vinte unidades de EBC e a escura com vinte ou mais unidades de EBC.

Figura 1 – Classificação de cor nas escalas de cores SRM e EBC.

| SRM/Lovibond |                                                                                     | Cerveja                                        | Cor da Cerveja                                                                        | EBC |
|--------------|-------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 2            |    | Pale lager, Witbier, Pilsener, Berliner Weisse |    | 4   |
| 3            |    | Maibock, Blonde Ale                            |    | 6   |
| 4            |    | Weissbier                                      |    | 8   |
| 6            |    | American Pale Ale, India Pale Ale              |    | 12  |
| 8            |    | Weissbier, Saison                              |    | 16  |
| 10           |    | English Bitter, ESB                            |    | 20  |
| 13           |    | Biere de Garde, Double IPA                     |    | 26  |
| 17           |    | Dark lager, Vienna lager, Marzen, Amber Ale    |    | 33  |
| 20           |    | Brown Ale, Bock, Dunkel, Dunkelweizen          |    | 39  |
| 24           |    | Irish Dry Stout, Doppelbock, Porter            |    | 47  |
| 29           |  | Stout                                          |  | 57  |
| 35           |  | Foreign Stout, Baltic Porter                   |  | 69  |
| 40+          |  | Imperial Stout                                 |  | 79  |

Fonte: ACADEMIA ARTESANAL, 2023.

O parâmetro mais chamativo da cerveja é a cor, muitas vezes a cor é definida como a identidade da bebida. Além das substâncias corantes do malte, podem ser adicionadas frutas e corantes naturais ao processo produtivo da cerveja, pois a legislação autoriza esses corantes para intensificar ou corrigir a cor da cerveja.

#### 2.4.4. SRM

*Standard reference method* (SRM), é o método de avaliação de cor de mosto ou da cerveja utilizado pela American Society of Brewing Chemists. Este método é medido numa célula de comprimento de percurso de 0,5 polegadas com comprimento de onda de 430 nanômetros e o valor de absorbância resultante é multiplicado por 10 para produzir o valor da cor (OLIVER, 2011). A Figura 1 acima, mostra a cor em SRM para alguns tipos de cerveja.

#### 2.5. Cerveja artesanal

Visto que o Ministério da Agricultura não dispõe de regulamentação para determinar o que realmente caracteriza uma cerveja como artesanal, vamos adotar o padrão estabelecido pela

Associação Brasileira de Cerveja Artesanal (Abracerva), que considera cervejas artesanais aquelas produzidas por empresas que não sejam multinacionais e com produção inferior a 5 milhões de litros por ano. De acordo com o presidente da Abracerva, as marcas que se enquadram neste conceito são as que priorizam a qualidade ao invés do ganho rápido de escala com utilização de ingredientes de menor valor agregado (ABRACERVA, 2018).

De acordo com a perspectiva da Brewers Association (2021), as cervejas artesanais são produzidas em pequena escala, possuem um processo de fermentação relativamente lento e com características diferenciadas se comparadas às cervejas industriais comuns. Como por exemplo, não há a adição de estabilizantes, corantes ou aromatizantes (KRAFTCHICK et al. 2014).

As cervejarias podem ser classificadas de acordo com sua capacidade de produção e a tradição de cada uma delas. De acordo com a visão de Deus e Oliveira (2021), a divisão mais utilizada é apresentada a seguir:

a) Mega cervejarias: responsáveis pela produção de mais de 10 bilhões de litros de cerveja por ano e concentram quase metade da produção mundial, principalmente as Pilsen;

b) Cervejarias grandes e tradicionais: referentes à produção de mais de 1 bilhão de litros por ano, com significativa representatividade no mercado;

c) Microcervejarias: produção de até 1,7 milhão de litros por ano, no entanto, seu produto apresenta características diferenciadas, marcadas pela qualidade e tradição no local em que são produzidas.

Segundo Morado (2017), também existem as nanocervejarias, que possuem os mesmos objetivos das micro cervejarias, mas sem as exigências tributárias e fiscais determinadas pelo governo ao microempresário. Além disso, Morado (2017) inclui na sua classificação os *homebrewers*, que são produtores caseiros com produção em escalas mínimas, motivados pelo prazer da produção como hobby e consumo próprio, sendo geralmente associado a gastronomia com foco em sabores diferenciados, com insumos de qualidade superior (SPINDLER, 2019).

As cervejas especiais e artesanais de produção caseira ou geralmente proveniente de micro cervejarias e nano cervejarias são definidas como bebidas de maior valor agregado e pela sua excelência em qualidade, sendo que o padrão de consumo de cervejas artesanais não é por preço, mas sim por qualidade e por experiências gustativas (SEBRAE, 2014). As cervejas

artesanais, além de sua essência diferenciada também se destacam pelos aspectos visuais, por suas garrafas e seus rótulos que recebem uma atenção diferenciada, pois atendem um público mais exigente. São por esses fatores cuidadosos que geralmente as cervejas artesanais são associadas com experiências gastronômicas mais ricas e complexas.

A cerveja artesanal tem no seu processo características únicas, visto que é o mestre cervejeiro que cria sua receita através de processos novos de tentativas e erros, tendo cores, aromas e sabores diferenciados. Em seu processo de produção são utilizados não apenas ingredientes básicos de fabricação (água, malte, lúpulo e levedura), como também especiarias como café, pimenta, banana, gengibre entre outros, que dão um toque diferenciado à cerveja (IBANEZ, 2017). Desde a década de 80 o Brasil produz cerveja artesanal e hoje está entre os maiores fabricantes do mundo (LEMOS, 2016).

É por isso que os produtores de cervejas artesanais, são capazes de resgatar as tradições cervejeiras, que foram deixadas de lado pelas grandes indústrias, além de trazer inovações que apostam na combinação de ingredientes e insumos não antes pensados, tendo em vista a qualidade do produto e uma constante mudança nos hábitos de consumo das pessoas (GIORGI, 2016).

Outro fator importante na fabricação e no consumo dessas bebidas é o apelo nutritivo e de saudabilidade, pois segundo Silva (2005), a cerveja quando consumida moderadamente, é compatível com uma dieta equilibrada, sendo capaz de proporcionar uma autêntica fonte de nutrientes e fibras solúveis, pois contém importantes vitaminas do complexo B, polifenóis, fosfatos, ácidos orgânicos e ácidos nucleicos, presentes no malte e no lúpulo.

## **2.6. American Barleywine**

A *American Barleywine* é uma cerveja pertencente à família das ales (alta fermentação) e classificada como uma *American strong ale*. Esta cerveja é uma adaptação da English Barleywine, uma cerveja da escola tradicional inglesa. A versão americana é caracterizada pelos seus ingredientes nacionais e com maior ênfase no amargor, sabor e aroma do lúpulo, em relação a versão inglesa, além de ter uma menor presença do sabor de malte e uma coloração mais escura (BJCP, 2021).

### 2.6.1. História da cerveja *American Barleywine*

A Barleywine, seguindo uma tradução literal, significa vinho de cevada. Essa bebida surgiu da fusão da cultura cervejeira da Inglaterra com a cultura de vinhos da França quando a Grã-Bretanha foi invadida e conquistada pela Normandia no século 11. Esse estilo é considerado um dos mais nobres da escola inglesa de cerveja, essa bebida era tradicionalmente consumida apenas pelas famílias mais ricas da Inglaterra, devido ao alto custo dos barris de envelhecimento da cerveja (CERVEJARIA ANTUÉRPIA, 20XX).

A companhia Bass Brewery, uma cervejaria inglesa, fundada em 1777, de muito sucesso, que segundo Martyn (2015), em 1877 se tornou a maior cervejaria do mundo com uma produção anual de 1 milhão de barris e foi a primeira a produzir em massa a cerveja do estilo Barleywine no ano de 1870. Já nos Estados Unidos, foi a cervejaria Anchor Brewing a primeira a introduzir o estilo, com uma versão fortemente lupulada e com leveduras nacionais (AmericanCraftBeer, 2014).

### 2.6.2. Especificações da *American Barleywine*

Conforme o BJCP Style Guidelines (2021), a *American Barleywine* é uma American ale muito forte, maltada, com a presença de lúpulos evidente a todo momento e de corpo alto. Possui uma impressão geral de um corpo rico e complexo em maltes com doçura residual, sua força de álcool e o amargor do lúpulo frequentemente combinam-se para deixar um final longo e marcante.

Sua aparência pode variar com uma cor de âmbar claro à cobre médio, podendo chegar a ser tão escura como marrom claro. Sua espuma tem característica de formação moderadamente baixa de coloração bege claro à um cobre sutil, que pode ter baixa retenção de espuma. Pode ser turva com Chill Haze em temperaturas mais baixas, mas geralmente desaparece e alcança uma boa limpidez e fica brilhante, à medida que a temperatura da cerveja aumenta.

Seu aroma é forte de malte e de lúpulo. É uma cerveja muito lupulada demonstrando uma ampla variedade de notas cítricas, frutadas ou resinosas. Aromas de maltes ricos, com um caráter que pode ser doce, de caramelo, de pão, ou razoavelmente neutro. Ésteres frutados baixo a moderadamente fortes e aromas alcoólicos.

Sua sensação de boca é altamente encorpada e mastigável, com uma textura aveludada que pode diminuir com o tempo de envelhecimento. A cerveja traz o calor do álcool, que deve

ser suave e perceptível, porém não deve queimar ao beber. A carbonatação pode ser baixa a moderada, dependendo do envelhecimento e do acondicionamento da cerveja. A Tabela 2, traz as características vitais esperadas do estilo *American Barleywine*.

Tabela 2 – Características vitais da cerveja *American Barleywine*.

| Estatísticas                | Unidades                         |
|-----------------------------|----------------------------------|
| Gravidade original (°Plato) | 1.088 - 1.120 (21.1 - 28 °Plato) |
| Gravidade final (°Plato)    | 1.024 - 1.032 (6.1 - 8°Plato)    |
| teor alcoólico              | 8.5% - 12.2%                     |
| Bitterness (IBU)            | 45 – 85                          |
| Cor SRM/EBC                 | 5+ / 10+                         |

Fonte: Brewers Association Style guidelines (2022).

## 2.7. Matérias-Primas: principais insumos para fabricação de cerveja

Para a produção artesanal da cerveja utilizaram-se as seguintes matérias-primas: água, malte, lúpulo e levedura.

### 2.7.1. Água

A água é o ingrediente em maior proporção na cerveja de acordo com Oliver (2011), estima-se que 92 a 95% do peso da cerveja seja composto por água. Desse modo, a água é, pela quantidade, a principal matéria-prima no decorrer de um processo cervejeiro e por tanto, suas propriedades são um dos fatores mais significativos na qualidade final do produto. Segundo Palmer (2017), é de grande importância utilizar água insípida, inodora, cristalina, com pH entre 5,2 a 5,6 e preferencialmente que seja de fonte mineral, devido a baixas concentrações de cloro e flúor.

A sua composição química tem uma relevância muito significativa no processo de produção da cerveja, influenciando em todas as etapas de produção. Parâmetros como: pH, alcalinidade, salinidade e grau de dureza devem ser calibrados, uma vez que, causam direta influência em características da cerveja como cor, turbidez, sabor, aroma e estabilidade (PACHECA, 2016).

Com o atual avanço e disposição da tecnologia, é possível utilizar a água sem composição química adequada e ter seus parâmetros ajustados conforme a necessidade e formulação da cerveja (MORADO, 2017).

A água pode apresentar em sua composição sais dissolvidos em concentrações e qualidades de modo diferenciado, conforme a região de sua localização, por isso a escolha da localidade da indústria ou complexo cervejeiro é de grande importância, visando uma composição uniforme e boa qualidade da água. A seguir, na tabela estão apresentados genericamente as características e parâmetros esperados de uma água cervejeira de boa qualidade.

Tabela 3 – Características da água para a produção de cerveja.

| <b>Parâmetro</b>           | <b>Unidade</b>        | <b>Especificação</b> |
|----------------------------|-----------------------|----------------------|
| Sabor                      | -                     | Insípida             |
| Odor                       | -                     | Inodora              |
| pH                         | -                     | 6,5 – 8,0            |
| Turbidez                   | NTU                   | Menor que 0,4        |
| Matéria Orgânica           | Mg O <sub>2</sub> /L  | 0 – 0,8              |
| Sólidos totais dissolvidos | Mg/L                  | 50 – 150             |
| Dureza total               | mgCaCO <sub>3</sub>   | 18 – 79              |
| Sulfatos                   | mgSO <sub>4</sub> /L  | 1 – 30               |
| Cloretos                   | mgCL/L                | 1 – 20               |
| Nitratos                   | MgNO <sub>3</sub> /L  | Ausente              |
| Cálcio                     | mgCa <sub>2+</sub> /L | 5 – 22               |
| Magnésio                   | mgMg <sub>2+</sub> /L | 1 – 6                |
| CO <sub>2</sub> Livre      | mgCO <sub>2</sub> /L  | 0,5 – 5              |

Fonte: Adaptado de MATOS, 2011.

A principal propriedade da água na produção de cervejas é sua dureza, que pode ser dividida entre dureza permanente e dureza temporária, referindo-se respectivamente a concentração de íons cálcio (Ca<sup>2+</sup>) e magnésio (Mg<sup>2+</sup>) e a segunda pela concentração de bicarbonatos de cálcio e magnésio. A dureza permanente pode ser reduzida com a utilização

de aditivos químicos e a temporária pode ser removida através da fervura (MACEDO, 2005; ABDALLA et al., 2010).

Os principais íons de elementos químicos presentes em sua composição são: cálcio, magnésio, bicarbonato, sódio, sulfato e cloreto, estes, reagem entre si e com os outros ingredientes da formulação, promovendo características tanto desejáveis quanto indesejáveis na cerveja (DRAGONE; ALMEIDA E SILVA, 2010).

A alta concentração de sais, promove o aumento do pH e consequentemente uma má formação de açúcares (redução da atividade enzimática), uma lenta degradação proteica, a extração de polifenóis e melhor solubilização das substâncias amargas do lúpulo. O pH alcalino poderá dissolver materiais que estão contidos no malte e nas cascas da cevada, sendo estes não desejáveis ao processo, resultando em uma cerveja de coloração mais escura e mais amarga (OLIVEIRA, 2011; JORGE, 2018).

Já quando a concentração de sais é baixa, ocorre o aumento da acidez, promovendo um ambiente de máxima atividade enzimática, resultando em uma boa transformação de amido em açúcares fermentescíveis, boa degradação proteica, pequeno aumento da cor e uma menor solubilização de substâncias amargas do lúpulo. (PRIEST e STEWART, 2006)

Existem dois tipos de água utilizadas na fabricação da cerveja: a primária sendo também conhecida como água cervejeira, que necessita de um tratamento minucioso e é utilizada nos processos de produção da cerveja como mosturação, lavagem do mosto, filtração na higienização de equipamentos e utensílios, já a secundária pode ser de qualidade mediana e é utilizada em procedimentos secundários, como limpeza de locais e equipamentos que não entram em contato com a cerveja (ROSA; AFONSO, 2015; NEVES, 2011).

#### 2.7.2. Malte de cevada

O malte é a principal fonte de carboidratos para a cerveja e é a matéria-prima proveniente do processo de germinação de cereais por malteação. A malteação é o processo de promover em condições controladas a ativação do metabolismo do cereal, ativando suas enzimas e convertendo o amido do endosperma em açúcares fermentescíveis (BELETI et al., 2012).

Diversos cereais podem originar o malte, dentre eles a cevada, o trigo, a aveia, entre outros. O principal utilizado na indústria cervejeira é a cevada, uma planta da família das

gramíneas que é comumente cultivada em regiões de climas temperados, para alimentação de pessoas e animais. Seus grãos (ou sementes) apresentam alto teor de amido e baixa quantidade de proteínas (MEGA; NEVES; ANDRADE, 2011). Sua composição aliada de seu alto poder diastático, ou seja, sua alta atividade enzimática, tornam esse cereal uma ótima opção para produção de cerveja. (OETTERER et al., 2006)

O malte de cevada (apresentado na Figura 2) é obtido do processo de malteação de seu cereal, este processo consiste na embebição (maceração) dos grãos, para promover sua germinação sob condições controladas, produzindo enzimas que transformam internamente os grãos de cevada e liberam suas reservas de amido (MORTON, 2017).

Figura 2 – Malte de cevada: Malte pilsen - Agrária (nacional).



Fonte: CERVEJA DA CASA, 2023.

O complexo enzimático do malte é composto pelas enzimas,  $\alpha$ -amilase,  $\beta$ -amilase e protease presentes na cevada, realizam a importante tarefa da transformação do amido em açúcares menores, tanto na germinação quanto na posterior etapa de mosturação.

Quando a produção do complexo de enzimas e as modificações no endosperma atingirem seu nível ótimo, a atividade enzimática deve ser parada por meio da última etapa da malteação, que consiste na secagem e torra do malte (LEMOS, 2017).

Existem muitas variedades de malte, eles diferem uns dos outros pelas suas características de sabor, aroma e cor. Na produção da cerveja pode ser utilizado um único tipo, ou como de maneira mais comum, uma combinação de tipos de malte (VENTURINI FILHO,

2010). A secagem se faz a temperaturas que variam de 20 °C a 100 °C conforme o malte deva ser claro ou escuro. Conforme a Figura 3, é possível observar a influência de diferentes tempos e temperaturas na torra do malte.

Figura 3 – Diferentes níveis de torra do malte.



Fonte: CERVEJAPETRA, 2017.

### 2.7.3. Lúpulo (*Humulus lupulus* L.)

O lúpulo é o ingrediente responsável por fornecer amargor, influenciar no aroma e sabor da cerveja, além de aumentar a sua estabilidade microbiológica e auxiliar na estabilidade da espuma. Embora existam registros do plantio de lúpulo que datam desde 200 d.C. (MOIR, 2000), o primeiro registro de sua utilização na produção de cerveja data de 822 d.C., em um mosteiro no nordeste da França, chamado de Beneditino de Corbie, onde monges adicionaram lúpulo na cerveja (OLIVER, 2011).

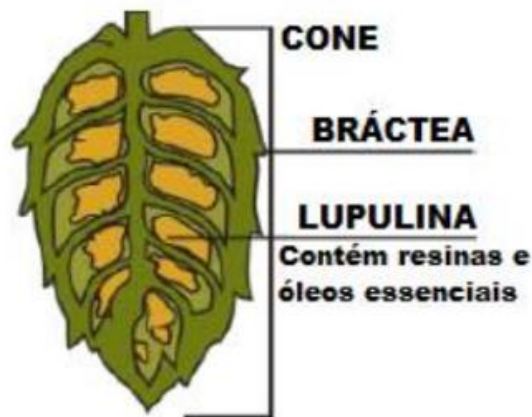
Inicialmente sua utilização foi estritamente para meios de conservação da cerveja, segundo (FAGHERAZZI et al., 2017), em 1153 para que a cerveja transportada em embarcações mantivesse boa qualidade e conservação durante longas viagens, grandes quantidades de lúpulo eram adicionadas aos barris com a cerveja já pronta.

No período da idade média, na Europa, pode-se observar na trajetória da evolução da cerveja, o início da produção em largas escalas, foi nesse período em que o lúpulo foi oficialmente introduzido e considerado como ingrediente indispensável na produção da cerveja, através da lei alemã “Reinheitsgebot” promulgada pelo duque Guilherme IV da Baviera em 1516 (DRAGONE; SILVA, 2010). Essa lei determinava que qualquer cerveja a ser

produzida ou consumida na região deveria explicitamente conter apenas água pura, malte e lúpulo, tendo em mente que nesta época não se considerava o uso de leveduras, pois ainda não haviam sido descobertas e, portanto, a fermentação ocorria de maneira natural (PEREIRA, 2015).

O lúpulo é a inflorescência de uma planta trepadeira, dioica e nativa do hemisfério norte, podendo ser encontrada nas regiões subtropicais da Europa e Ásia. Seu nome científico é *Humulus lupulus* (FIG. 4). Apesar de possuir variantes masculinas e femininas, apenas as femininas são de interesse para a indústria cervejeira, uma vez que estas contêm em maior quantidade a glândula lupulínica, capaz de secretar a substância lupulina. (NORTON, 2017).

Figura 4 – Esquema da flor fêmea do lúpulo (*Humulus lupulus* L.).



Fonte: CONDADO DA CERVEJA, 2016.

Além de suas características essenciais para a cerveja, como aroma e amargor, o lúpulo também possui antioxidantes naturais, é um ótimo agente bacteriostático, atuando como conservante e coagulante de proteínas. (FAGHERAZZI et al., 2017).

Existem muitas variedades de lúpulos hoje comercializados, os tipos mais comuns de lúpulo são: Cascade, Chinook, Centennial e Citra, entre outros. O consumo de lúpulo pela indústria cervejeira é tanto que em torno de 97% de sua produção é destinada à fabricação de cerveja. Grande parte da produção mundial de lúpulo (75-80%) está concentrada em países como Alemanha e Estados Unidos devido a estes locais possuírem condições ótimas para seu cultivo, como clima frio e solos argilosos ou arenosos profundos, pois suas raízes podem atingir mais de 2 metros de profundidade e a grande incidência de luz durante o dia (necessidade de 15 a 18 horas de sol por dia). Devido a esses fatores e necessidades para seu cultivo, o lúpulo

por muito tempo não era de interesse aos agricultores brasileiros. Recentemente foi observado o sucesso em seu cultivo em diferentes regiões brasileiras como no sul, sudeste, norte e nordeste.

Existem mais de 30 variedades americanas e mais de 40 variedades europeias importantes de lúpulo. De maneira geral, existe uma classificação para as variedades do lúpulo entre as espécies utilizadas, que são os lúpulos aromáticos, de sabor (amargor) e de dupla aptidão (SPÓSITO et al., 2019). Os lúpulos de amargor, são aqueles com alta concentração de  $\alpha$ -ácidos, superiores em 9% em peso, já os aromáticos possuem um teor menor em média de 7%, fornecendo um aroma mais complexo e agradável e um leve amargor para a cerveja. (FAGHERAZZI et al., 2017). O lúpulo classificado como dupla aptidão, apresenta a combinação balanceada de sabor amargo e aromático (HIERONYMUS, S. 2012). A Tabela 4 apresenta a composição química do lúpulo em flor.

Tabela 4 – Principais constituintes da composição química do lúpulo em flor.

| Constituinte       | Quantidade % (m/m) |
|--------------------|--------------------|
| Resinas totais     | 15-30              |
| Óleos essenciais   | 0,5-3              |
| Proteínas          | 15                 |
| Monossacarídeos    | 2                  |
| Polifenóis         | 4                  |
| Pectinas           | 2                  |
| Aminoácidos        | 0,1                |
| Ceras e esteroides | Traços – 25        |
| Cinzas             | 8                  |
| Água               | 10                 |
| Celulose/lignina   | 43                 |

Fonte: ALMAUGUER et al., 2014.

Exemplos de lúpulos de cada classificação (SPÓSITO et al., 2019):

- Lúpulos de amargor: Admiral, Magnum e Nugget;
- Lúpulos de aroma: Fuggle, Cascade, Hallertau, Citra, Saaz e Mantiqueira (brasileira);

- Lúpulos de dupla aptidão: Centennial, Chinook, Northern Brewer, Columbus e Mosaic.

Nas inflorescências do lúpulo, chamadas de cones, são produzidas as resinas de interesse, mais precisamente nas glândulas de lupulina que estão presentes nos tricomas de suas brácteas conforme pode-se observar na Figura 5. Dentre os compostos produzidos e presentes na resina, destacam-se os alfa e beta ácidos que são responsáveis pelo amargor da cerveja. Já os óleos essenciais são responsáveis pelo seu aroma e os polifenóis (SPÓSITO, ISMAEL, BARBOSA, & TAGLIAFERRO, 2019).

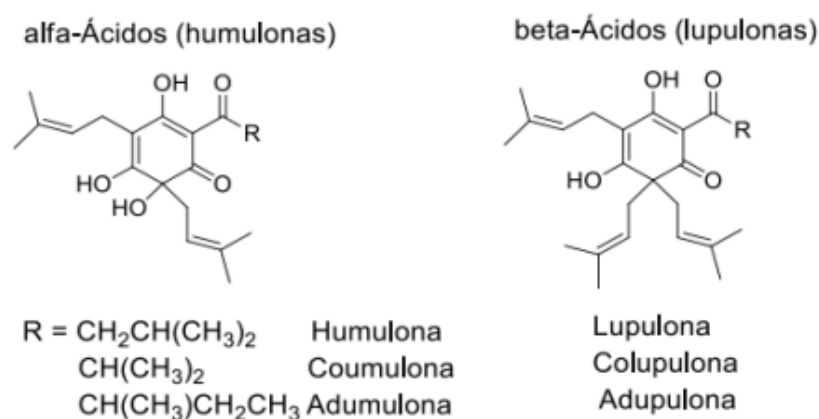
Figura 5 – Glândulas de lupulina fixadas nas brácteas das inflorescências de plantas de lúpulo.



Fonte: FIZZLAB, 2017

A concentração de alfa-ácidos, também chamados de humulonas na resina encontra-se entre 3 e 17% e a de beta-ácidos, também chamados de lupulonas entre 3 e 7%, ambas possuem potencial bacteriostático e inibem o crescimento de bactérias gram-positivas. A figura 6 representa as estruturas químicas destes compostos (SPÓSITO, ISMAEL, BARBOSA, & TAGLIAFERRO, 2019).

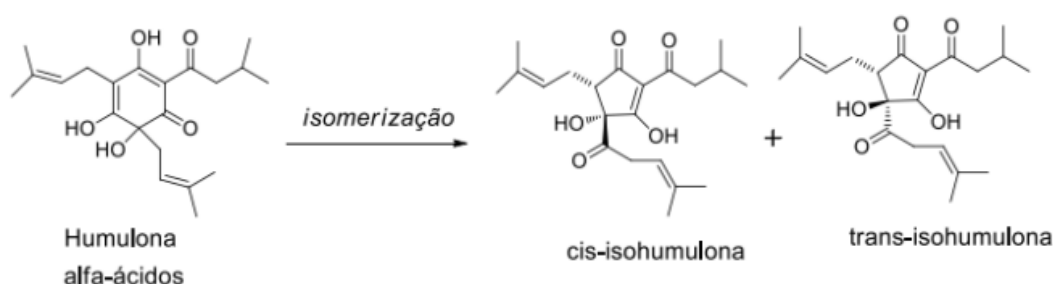
Figura 6 – Estruturas químicas dos principais  $\alpha$ -ácidos e  $\beta$ -ácidos presentes no lúpulo.



Fonte: KEUKELEIRE, 2000.

Durante a etapa de fervura do mosto cervejeiro, o lúpulo que é adicionado já no início do procedimento, sofre a isomerização de seus alfas-ácidos devido à exposição a altas temperaturas, formando iso- $\alpha$ -ácidos (Figura 7). Cada humulona gera duas iso-humulonas: a cis-iso-humulona e a trans-iso-humulona (BRIGGS, 2004). As iso-humulonas são consideradas mais amargas e com isso o grau de amargor da cerveja dependerá das condições de fervura do mosto, uma vez que períodos mais prolongados de fervura resultam na isomerização de um maior percentual de alfa-ácidos disponíveis. (SILVA; FARIA, 2008). (SPÓSITO, ISMAEL, BARBOSA, & TAGLIAFERRO, 2019).

Figura 7 – Estrutura dos produtos de isomerização da Humulona: cis-isohumulona e trans-isohumulona.



Fonte: KEUKELEIRE, 2000.

Os óleos essenciais por sua vez, são compostos altamente voláteis, ocorrendo perdas de até 98% ao decorrer do processo de fervura, onde os aromas não são incorporados pela cerveja,

sendo levado pelo dióxido de carbono (PALMER, 2017). Para fins de melhor incorporar as características aromáticas do lúpulo e seus óleos essenciais, existe a técnica de dry hopping, um método de infusão a frio onde o lúpulo é adicionado na fase fria do processo cervejeiro, ou seja, durante a fermentação e maturação da cerveja. Como esse processo ocorre em temperaturas inferiores da fermentação, não existem perdas significativas de aromas e os alfa-ácidos responsáveis pelo amargor não são isomerizados e permanecem insolúveis (OLIVER, 2011).

As principais formas de comercialização do lúpulo são: flores secas (in natura), pellets, extratos e essências. A flor é completamente natural, contudo, não é ideal para a estocagem e não é eficiente para a produção da cerveja, já os pellets (figura 8), que são pelotas secas e moídas da flor, facilitam o transporte e armazenamento, aumentando gradativamente sua validade (FAGHERAZZI et al., 2017).

Figura 8 – Lúpulo Cascade em pellets.



Fonte: LAMASBREWSHOP, 2022.

#### 2.7.4. Levedura

As leveduras são microrganismos eucarióticos que possuem a habilidade de metabolizar de forma eficiente os constituintes do mosto rico em açúcares fermentescíveis. As espécies mais utilizadas em cervejarias são duas do gênero *Saccharomyces*. As *Saccharomyces cerevisiae* que são de alta fermentação, típicas das ales, e as *Saccharomyces uvarum* de baixa fermentação, que são típicas das Lagers (PALMER, 2017).

Esses fungos são responsáveis pela fermentação alcoólica do mosto cervejeiro a partir da metabolização dos açúcares fermentescíveis para produzir álcool, gás carbônico, energia na forma de ATP e calor (BOULTON; QUAIN 2008). Os açúcares fermentescíveis são a sacarose, a glicose, a frutose, a galactose, a manose, a maltose e a maltotriose. A produção de etanol é o principal produto da fermentação de *Saccharomyces*, que passa a ser sintetizado a partir da descarboxilação do piruvato produzido em uma rota metabólica. Essa reação dá origem ao acetaldeído que finalmente se reduz a etanol (MORADO, 2017).

As leveduras, assim como os outros ingredientes da cerveja geram determinadas características e propriedades a cerveja, ajudam também a definir o seu caráter e sabor pelos produtos secundários da fermentação que são ésteres, álcoois superiores, cetonas, fenóis e ácidos graxos. Algumas leveduras podem apresentar aspectos florais, frutados ou minerais, indicados para diferentes estilos de cerveja (CARVALHO, 2007).

#### 2.7.5. Especiarias e adjuntos

Dentro da cultura da cerveja, sabe-se que o ramo da cerveja artesanal tem demonstrado crescente aumento em sua popularidade, fato que é devido à grande variedade de estilos oferecidos. O diferencial da cerveja artesanal é sua capacidade de trazer aromas e sabores novos, que antes não eram encontrados em cervejas de produção industrial de larga escala.

As cervejarias artesanais, por empregarem menor escala produtiva, possibilitam a produção de cervejas diferenciadas para os consumidores mais exigentes, com maior cuidado na seleção da matéria-prima e qualidade. Isso possibilita ainda a adição de diferentes adjuntos como frutas, cereais, legumes etc. A crescente atenção dos consumidores à saúde tem trazido diversos novos produtos para o mercado de alimentos e bebidas, no geral através de inovações busca manter esse nicho de consumidores. O uso de frutas com atividades benéficas à saúde pode ser uma alternativa para criação de cervejas com potencial atividade funcional (MORADO, 2017).

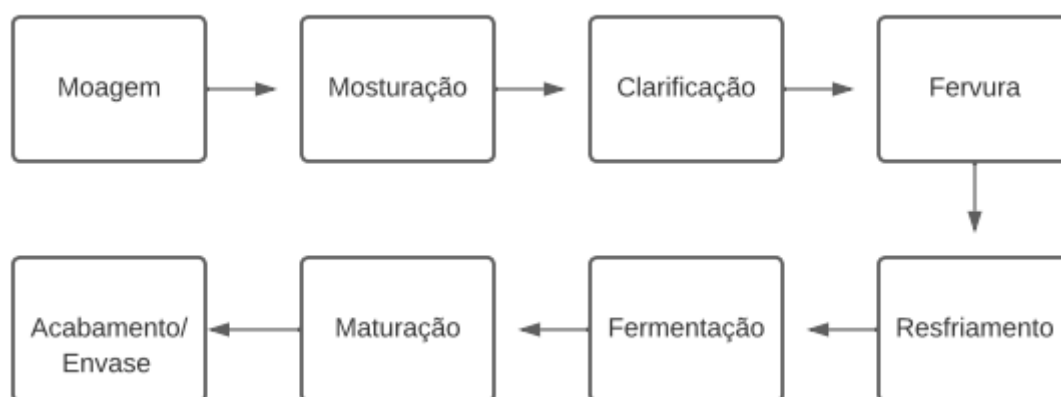
## 2.8. Processamento

### 2.8.1. Processo de produção de cerveja

O processo tradicional de produção de cerveja, pode ser dividido em duas grandes categorias: brassagem e fermentação. No entanto, cada uma dessas categorias engloba várias etapas individuais conforme o fluxograma apresentado na Figura 9. Na etapa inicial da

brassagem, os componentes complexos dos maltes, como o amido, são solubilizados em água e degradados através da ação de enzimas, como resultado dessa etapa é obtido um líquido chamado de mosto, com componentes mais simples, como açúcares. Na segunda etapa, os componentes simples do mosto são metabolizados pelas leveduras, gerando como principais produtos, o etanol e o gás carbônico, que após o período de maturação e posterior envase é obtida a cerveja. (PALMER, 2017; KUNZE, 2010).

Figura 9 – Fluxograma do processo de produção da cerveja.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Ao redor do mundo existem diversos estilos e variados métodos de produção de cerveja, de modo geral, existem duas grandes categorias de cervejas, separadas em função das leveduras utilizadas no processo fermentativo: tipo ale, de alta fermentação, em que as leveduras ficam na superfície do fermentador ao término desta etapa, gerando normalmente cervejas com sabores mais fortes e com maior grau alcoólico e a tipo lager, de baixa fermentação, em que as leveduras sedimentam no fermentador ao final desta etapa (DRAGONE; ALMEIDA E SILVA, 2010)

Na produção artesanal, as técnicas utilizadas são mais simples e os equipamentos não precisam ser, necessariamente, modernos e sofisticados como em grandes complexos industriais, porém, é preciso conhecer detalhadamente cada etapa e manter um rigoroso sistema de qualidade para ambas as frentes de produção.

## 2.8.2. Brassagem

### 2.8.2.1. Moagem do malte

A primeira etapa do processo de produção de uma cerveja é a moagem do malte, isto é, a trituração do grão de malte de cevada para expor seu endosperma rico em reservas de amido

para que o seu complexo de enzimas amilolíticas possam atuar durante a etapa de mosturação. A moagem é uma etapa bastante importante de modo com que a granulometria do malte deve ser cuidadosamente observada, influenciando diretamente a velocidade das transformações físico-químicas, rendimento, clarificação e qualidade final da cerveja (DRAGONE; ALMEIDA; SILVA, 2010).

Existem duas tecnologias básicas de moagem: a seca e a úmida. A moagem do malte não deve ser muito fina a ponto de tornar-se lenta a filtração do mosto ou, ao contrário, muito grossa, o que dificulta a hidrólise do amido (REINOLD, 1997). O malte é colocado no interior de um moinho de rolos cilíndricos, em números de dois, quatro ou até seis.

De acordo com Kunze (2010), em um moinho de 2 rolos, por exemplo, o espaçamento ideal entre eles está em torno de 0,8 mm, de modo a gerar um meio filtrante adequado durante a clarificação e ao mesmo tempo promovendo a máxima eficiência de extração de açúcar, respectivamente através de boa integridade das cascas e boa disponibilidade do endosperma dos maltes para a atividade enzimática durante a mosturação.

Dessa forma, para conseguir gerar um meio filtrante adequado com o máximo de eficiência de extração de açúcar, dois pontos precisam ser avaliados na moagem: a integridade das cascas e a disponibilidade do material interno dos maltes. Em resumo, as cascas precisam estar as mais intactas possíveis, para se ter uma melhor filtração durante a clarificação e ao mesmo passo que o material interno do malte deve estar o mais exposto à água e à atividade enzimática. Sendo assim, para atingir o nível de quebra ideal durante a moagem, faz-se necessário o ajuste do espaçamento dos rolos do moinho.

Uma moagem eficaz é aquela onde o moedor não tritura o malte totalmente, apenas quebra os grãos, deixando uma quantidade equilibrada de cascas, e pequenas quantidades de farelos. Em percentuais, tem-se que a moagem ideal produz 20 a 25% de cascas, 45 a 65% de sêmola e 15 a 25% de farinha. (SILVA, 2017).

#### 2.8.2.2. Mosturação

Com o malte previamente moído, a etapa da brassagem se inicia pela criação do mosto, neste momento temos a formação de um líquido turvo e grosso conhecido como mosto cervejeiro (CARVALHO, BENTO & SILVA 2006). A mosturação tem como principal objetivo solubilizar substâncias do malte diretamente solúveis em água e através da ação

enzimática solubilizar substâncias insolúveis, como o amido, promovendo sua gomificação e posterior hidrólise em açúcares fermentescíveis (DRAGONE; ALMEIDA E SILVA, 2010; VENTURINI FILHO, 2010).

Outras substâncias também são extraídas, como proteínas, vitaminas e taninos. (CARVALHO, 2007). As proteases são responsáveis pela transformação das proteínas de alta massa molar em proteínas de média e baixa massa molar. Estas reações são essenciais, tanto para a disponibilização do amido do grão quanto para aminoácidos ou peptídeos de cadeias curtas no mosto para que se consigam nutrientes para a levedura (CRUZ et al., 2008).

Para que a mosturação seja eficiente deve-se condicionar o mosto a faixas de temperatura específicas durante tempos predeterminados chamadas de rampas de temperatura, além de condições ótimas de pH para atuação enzimática.

Cada rampa de temperatura está ligada à atuação de um grupo de enzima específico. Um dos grupos de enzimas mais importante é o das amilases, sendo as principais a  $\alpha$ -amilase e a  $\beta$ -amilase, que promovem a sacarificação do amido presente no malte. A Tabela 5 apresenta um resumo da atuação enzimática e suas respectivas condições ótimas de pH e temperatura.

Tabela 5 – Atuação enzimática e suas condições ótimas de pH e temperatura.

| Enzima        | Atuação                                                                                | pH        | Temperatura | Substrato    |
|---------------|----------------------------------------------------------------------------------------|-----------|-------------|--------------|
| Alfa-amilase  | Decomposição do amido para dextrinas inferiores pela desagregação das combinações 1-4  | 5,6 a 5,8 | 70 a 75 °C  | Amido        |
| Beta-amilase  | Decomposição do amido para maltose pela desagregação das combinações 1-4               | 5,4 a 5,6 | 60 a 65 °C  | Amido        |
| Dextrinase    | Desagregação do amido para maltose e maltotriose pela desagregação das combinações 1-6 | 5,1       | 55 a 60 °C  | Amido        |
| Hemicelulase  | Decomposição da hemicelulose para glucanos de baixa e média massa molar.               | 4,5 a 4,7 | 40 a 45 °C  | Hemicelulose |
| Exopeptidase  | Decomposição das proteínas de alta e média massa molar para aminoácidos                | 5,2 a 8,2 | 40 a 50 °C  | Proteínas    |
| Endopeptidase | Decomposição das proteínas para produtos intermediários de alta e média massa molar    | 5,0       | 50 a 60 °C  | Proteínas    |

Fonte: TSCHOPE, 2001; DRAGONE; ALMEIDA E SILVA, 2010.

O amido é um carboidrato constituído por moléculas de glicose ( $C_6H_{10}O_6$ ) e tem a fórmula geral de  $(C_6H_{10}O_5)_n$ , é uma substância não homogênea constituída de amilose e amilopectina que se diferenciam pela maneira que as moléculas de glicose se unem umas às outras. A amilose possui uma estrutura de moléculas de glicose com cerca de 60 a 2 mil unidades, com ligações nas posições 1 e 4 formando cadeias sem ramificações e a amilopectina é caracterizada por uma estrutura em cadeia ramificada com cerca de 6 a 37 mil moléculas de glicose (KUNZE, 1995).

Durante a sacarificação, a amilose ataca as extremidades das moléculas de amido e quebra a ligação química entre os dois últimos açúcares, produzindo maltose (dissacarídeo com duas moléculas de glicose). Já a  $\alpha$ -amilase ataca as moléculas de amido em pontos aleatórios ao longo de suas cadeias, hidrolisando as ligações entre as glicoses produzindo polímeros de glicose de vários tamanhos, como glicose, maltose e maltotriose. Da mesma forma que a atuação dessas enzimas é diferente, as condições de temperatura e de pH também são. A  $\alpha$ -amilase trabalha em uma faixa ótima entre 70 e 75 °C e de pH entre 5,6 e 5,8 e a  $\beta$ -amilase, na faixa de temperatura de 60 e 65 °C e 5,4 e 5,6 de pH (MOSHER, TRANTHAM, 2016; TSCHOPE, 2001).

Após o término das rampas de temperatura enzimáticas, é realizado o teste com solução de iodo 0,2 N, a fim de verificar a sacarificação do malte. A completa hidrólise do amido é confirmada pela ausência da coloração roxo-azulada, característica da reação do iodo com o amido em temperatura ambiente (ALMEIDA E SILVA, 2005). Posteriormente, é utilizada uma outra rampa de temperatura, chamada de “*mash out*”, onde a temperatura do mosto é elevada para em torno de 78 °C durante 10 a 15 minutos com o objetivo de cessar a atividade enzimática e manter o perfil de compostos fermentescíveis (PALMER, 2017).

A alfa-amilase e a beta-amilase são enzimas vitais na mosturação da cerveja, atuando em temperaturas diferentes para converter amido em açúcar. A alfa-amilase (ativa entre 70-75°C) produz uma mistura de maltose, maltotriose e dextrinas, contribuindo para um corpo de cerveja mais encorpado. Uma mosturação mais quente favorece essa enzima, resultando em uma cerveja mais robusta e encorpada, devido à maior produção de dextrinas não fermentáveis e consequentemente menos alcoólica, devido à menor proporção de açúcares fermentáveis.

A beta-amilase (ativa entre 60-65°C) gera principalmente maltose, que é facilmente fermentável. Uma mosturação mais fria favorece essa enzima, podendo resultar em uma cerveja mais seca e alcoólica, devido à maior produção de açúcares altamente fermentáveis.

Portanto, a temperatura da mosturação pode moldar o perfil da cerveja, com mosturações mais frias favorecendo cervejas secas e alcoólicas e mosturações mais quentes resultando em cervejas mais encorpadas e menos alcoólicas. Influenciando também nas características reológicas do mosto, como a sua viscosidade, que pode ter impacto tanto no processo de fabricação quanto nas características sensoriais da cerveja final.

No início do processo de mosturação, o mosto tem alta viscosidade devido às proteínas e amidos do malte. À medida que a mosturação avança, a viscosidade diminui. Primeiro, as

enzimas proteolíticas quebram as proteínas em temperaturas entre 45-55°C, reduzindo a viscosidade. Depois, nas etapas de temperaturas mais altas (62-72°C), as enzimas amilolíticas decompõem os amidos em açúcares fermentáveis, diminuindo ainda mais a viscosidade. No final da mosturação, a viscosidade atinge seu ponto mais baixo devido à quebra de proteínas e amidos e à gelatinização do amido restante em temperaturas acima de 72°C.

#### 2.8.2.3. Clarificação e filtração

O objetivo dessa etapa é a separação das fases sólida e líquida obtidas na mosturação deixando a cerveja mais limpa, translúcida e evita que a casca do malte passe para o processo de fervura, liberando taninos no mosto. Vários equipamentos podem ser utilizados para a clarificação do mosto. Os principais são a tina-filtro e o filtro-prensa de placas (MOSHER, TRANTHAM, 2016).

Tanto no processo industrial quanto no artesanal, o método mais utilizado é através do uso de uma segunda tina ou panela, com fundo falso, provido de vários orifícios atuando como uma peneira, chamado de tina de filtração.

Segundo Russel e Stewart (1995), esse procedimento é realizado por sedimentação natural, onde será formada uma cama de cascas de malte que atuará como meio filtrante. À medida que o líquido passa pela camada filtrante, ele é retirado por baixo da tina e é clarificado por recirculação, posteriormente é realizada a lavagem da torta (bagaço) com água aquecida a 75 °C que seja extraído o máximo de açúcar possível e aumente o rendimento do processo (DRAGONE; ALMEIDA E SILVA, 2010). Assim, o mosto repete esse ciclo até que fique claro e sem impurezas e depois é enviado para outro reservatório chamado caldeira de fervura. (CRUZ et al, 2008).

Já no método do filtro-prensa, o mosto é bombeado para quadros que possuem telas de polipropileno, que retém as cascas e devido a fina porosidade das telas, resulta em uma melhor filtração. As demais etapas do procedimento são semelhantes ao usado na tina de filtração: o mosto é clarificado por recirculação, filtrado e finalmente é feita a lavagem do bagaço para retirada do extrato residual (CRUZ et al., 2008).

#### 2.8.3. Fervura

Com o mosto transferido para a tina de fervura, inicia-se a etapa de aquecimento do mosto até 100 °C, em que segundo Venturini Filho (2010), sob pressão atmosférica, deve durar

de 60 a 90 minutos. Neste momento, ocorrem vários processos importantes a fim de conferir estabilidade química, biológica e coloidal a cerveja, ou seja, inativação de enzimas, esterilização do mosto, coagulação proteica, extração de compostos amargos e aromáticos do lúpulo, formação de substâncias constituintes do aroma e sabor, evaporação de água excedente e de componentes aromáticos indesejáveis no produto final (KUNZE, 2010; TSCHOPE, 2001).

Segundo Cruz et. al (2008), o tempo de fervura inicia-se quando o mosto atingir o ponto de ebulição (100 °C), é nesse momento em que são adicionados os aditivos que fornecem as características organolépticas desejáveis na bebida, como o lúpulo, caramelo e mel.

O lúpulo pode ser acrescentado por parcelas durante o processo de fervura: no início, durante e próximo ao final. Uma parcela da quantidade do lúpulo previsto da formulação é adicionada ao início da fervura, com o intuito de promover a extração do amargor do lúpulo. Para isso, a planta deve ser fervida por aproximadamente uma hora, para que seus  $\alpha$ -ácidos possam ser transformados em iso- $\alpha$ -ácidos, compostos que conferem o amargor a cerveja.

Já na extração dos componentes aromáticos, pelo fato dos aromas provenientes dos óleos essenciais do lúpulo serem muito voláteis e serem evaporados juntamente com as moléculas de água, o lúpulo com a finalidade aromática é adicionado no final da fervura, permanecendo em ebulição entre 5 e 10 minutos (ALMEIDA, 2005; BREDA, 2010).

#### 2.8.4. Whirlpool

O mosto obtido proveniente da etapa de fervura, deve passar por etapas de retirada de precipitado, resfriamento e posterior aeração, visando melhor atuação da levedura (tratamento do mosto).

É de grande importância que terminado a fervura, o mosto seja resfriado rapidamente para evitar oxidação e contaminação por microrganismos, contudo, o primeiro passo é promover a remoção do precipitado chamado de *trub*. Neste momento, o procedimento mais comum é conhecido como “Whirlpool”, em que o mosto é bombeado tangencialmente em alta velocidade fazendo com que forças centrípetas proveniente da rotação forçada do meio, precipitam os sólidos em suspensão no centro da tina, assim, facilitando a transferência da fase líquida para a etapa de fermentação (KUNZE, 2010).

O *trub*, é o precipitado composto das partículas em suspensão presentes no mosto, oriundas de proteínas coaguladas, resinas, taninos e resíduos remanescentes dos lúpulos, quais devem ser retirados ou isolados do mosto límpido, uma vez que podem comprometer a

qualidade da fermentação, dando origem a ésteres, álcoois de maior cadeia molecular ou outras substâncias indesejáveis. (TSCHOPE, 2001; CEREDA, 1983).

#### 2.8.5. Oxigenação ou aeração

Outro parâmetro de grande importância que deve ser controlado antes da fermentação, é o oxigênio dissolvido no mosto, pois é necessário para a adaptação celular, fase em que as leveduras sintetizam ácidos graxos insaturados e esteróis, componentes estruturais que são fundamentais para a boa permeabilidade de suas membranas celulares sendo, assim, importantes para sua reprodução e vitalidade (KUCHARCZYK, TUSZYNSKI, 2017).

#### 2.8.6. Resfriamento

Resfriamento transcorre em um trocador de calor a placas planas ou o uso de chiller, passando de aproximadamente 100 °C até a temperatura de fermentação (REITENBACH, 2010). Existem dois tipos principais de leveduras, as do tipo Lager, que fermentam em temperaturas baixas, na faixa de 10 a 13 °C, e as do tipo ale, que fermentam em temperaturas mais elevadas, idealmente na faixa 18 a 21 °C, ao atingir a temperatura ideal a levedura pode ser inoculada ao mosto (CARVALHO, 2007).

#### 2.8.7. Fermentação

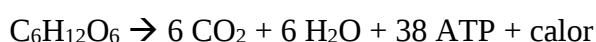
O mosto resfriado e oxigenado é então inoculado com uma quantidade predeterminada de levedura para desencadear o processo de fermentação. Esta, é uma etapa crucial no que se diz respeito a qualidade final da cerveja, por isso, diversos fatores necessitam de atenção especial, para que as condições de fermentação mantenham um ótimo balanço no metabolismo das leveduras, visando um equilíbrio perfeito entre os aromas e sabores gerados. Torna-se importante compreender o metabolismo da levedura e como ele é afetado por certos parâmetros, como a temperatura, o pH, o tempo de fermentação, a concentração de açúcar e a concentração inicial de levedura (WHITE, ZAINASHEFF, 2010).

Segundo Ferreira (2016) existem 3 tipos de fermentação: baixa fermentação, alta fermentação, fermentação espontânea. No Brasil é mais utilizada a baixa fermentação, para cervejas da família lager, esta fermentação ocorre de forma lenta, e dura algumas semanas. a alta fermentação é comum em cervejas do tipo ale.

O controle da temperatura na fermentação é crucial e tem impacto significativo no desenvolvimento do sabor da cerveja. Geralmente são utilizadas faixas de temperatura entre 15 e 22 °C, para a alta fermentação, e entre 9 e 14 °C, para a baixa fermentação (PHILLISKIRK, 2011). A combinação de temperatura e leveduras específicas gera perfis de sabor muito distintos nas cervejas.

Neste momento, ocorre a conversão dos açúcares em etanol e dióxido de carbono e a formação de produtos secundários desejáveis e indesejáveis. As leveduras degradam os açúcares presentes no mosto seguindo dois caminhos metabólicos, resumidamente, pode-se dividir a fermentação em duas etapas: numa primeira etapa denominada de aeróbia e uma segunda fase, anaeróbia (SANTOS, 2005).

Inicialmente, quando há presença de oxigênio, as leveduras metabolizam os açúcares seguindo a seguinte equação global (ALMEIDA E SILVA, 2005):



Nesta fase, conhecida como fase de adaptação ou predominantemente aeróbica, as leveduras iniciam a fermentação consumindo o oxigênio previamente fornecido pela aeração do mosto. Além disso, utilizam suas reservas de glicogênio e lipídios para sintetizar ácidos carboxílicos insaturados e esteróis. Esses compostos desempenham um papel fundamental na estrutura e permeabilidade da membrana celular, tornando-se essenciais para o processo de reprodução celular. Estudos como o de White e Zainasheff (2010) e Almeida e Silva (2005) ressaltam a relevância desses processos metabólicos durante a fase inicial da fermentação.

Posteriormente, após o consumo de O<sub>2</sub>, no segundo caminho metabólico, há a transformação dos açúcares fermentescíveis em etanol e CO<sub>2</sub>, seguindo a equação geral (WILLAERT, 2007):



É nesta fase, que de fato o mosto é transformado em cerveja e o restante dos açúcares fermentescíveis são consumidos gerando etanol, gás carbônico e produtos secundários de fermentação e pode ser denominada também, de fermentação primária.

## 2.8.8. Acabamento

### 2.8.8.1. Maturação

Após a fermentação tem-se o mosto fermentado que já possui várias características da cerveja a ser produzida, porém, a cerveja ainda não está pronta para o consumo. Isso ocorre porque as fermentações tendem a produzir sabores que são considerados indesejáveis. Por isso a cerveja deve maturar para se tornar palatável. A maturação envolve muitas reações bioquímicas, químicas e físicas (STEWART, 2011).

Segundo Palmer (2017), a maturação pode acontecer entre 7 e 15 dias, a uma temperatura entre 0 e 10 °C, fato que depende do método e do tipo de cerveja a ser produzida. Nessa etapa a exposição ao oxigênio contribui para a oxidação da cerveja e para sua contaminação, portanto todo cuidado é necessário durante a transferência da cerveja para outro tanque ou garrafa.

Com a redução da concentração de açúcares do mosto, a atividade celular é diminuída, e o processo entra em outra fase, a maturação. A maturação é dividida em duas etapas: a primeira, o descanso diacetil, na qual a temperatura é elevada em torno de 5 °C com a finalidade de usar o próprio metabolismo celular para consumir compostos indesejáveis, como o diacetil e o acetaldeído (WHITE, ZAINASHEFF, 2010) e a segunda, a maturação, na qual a temperatura é reduzida a valores próximos a 0 °C, com o objetivo de decantar a levedura e outros compostos que provocam turbidez à cerveja e deixá-la pronta para ser carbonatada e envasada (PALMER, 2017).

Uma boa maturação é fundamental para o amadurecimento da cerveja. no decorrer da maturação, as leveduras ainda agem, porém não geram mais álcool ou CO<sub>2</sub>, e sim reabsorvem alguns compostos, tornando a cerveja mais limpa e cristalina. Compostos procedentes da fermentação, como alguns compostos sulfurosos, são eliminados na maturação (MORADO, 2017; ALVISI, 2011).

### 2.8.8.2. Carbonatação (*priming*)

A carbonatação é uma etapa com finalidade de gerar uma quantidade de CO<sub>2</sub> na cerveja. Parte desse gás já é formado durante a fermentação pelas leveduras, porém para que as cervejas alcancem seu perfil sensorial característico, é necessário um volume maior de gás carbônico antes de envasar a cerveja. Essa quantidade varia de cerveja para cerveja, dependendo do estilo

escolhido. Ela é responsável pela formação de bolhas e pela espuma da cerveja (DINSLAKEN, 2017).

A gaseificação da cerveja pode ser feita de duas formas: injetando dióxido de carbono forçadamente ou por *priming*. Segundo Parks (2011) a carbonatação é uma das definidoras das características da cerveja, seus efeitos influenciam diretamente a sensação de sabor, aroma e aparência.

O *priming* é a adição de açúcar antes de engarrafar a cerveja. O fermento presente consome o açúcar e converte em álcool e gás carbônico que gaseifica o líquido, pois como logo a cerveja será engarrafada e fechada o gás irá se incorporar na cerveja. Já a outra maneira de carbonatação, a forçada, é a inserção de gás carbônico diretamente num recipiente onde o líquido já está, como por exemplo em barris de chope. (PARADA, 2017)

Na produção de cervejas artesanais usualmente se faz o *priming*, que consiste na adição de açúcar na cerveja não filtrada, e imediato envase.

No *priming* podem ser utilizados vários tipos de açúcar, porém o açúcar da cana tem uma excelente fermentabilidade, e é o mais usado para essa etapa, pois é de fácil uso da levedura, onde é preparada a solução de açúcar invertido. Açúcar invertido é a solução de açúcar fervido em água. Calcula-se o volume de cerveja a ser envasada, conforme o estilo da cerveja produzida é gasta uma quantidade diferente de açúcar por litro, utilizando uma faixa de 4g/L até 8g/L, conforme apresentado na Tabela 6. Com o *priming*, o teor alcoólico sofre um aumento, de aproximadamente 0,2% do volume. (SILVA, 2015).

Tabela 6 – Quantidade de açúcares para o *priming* em diferentes estilos de cerveja.

| Estilo da cerveja  | Açúcar/litros (g/L) |
|--------------------|---------------------|
| Baixa carbonatação | 4                   |
| Média carbonatação | 5 a 6               |
| Alta carbonatação  | 7 a 8               |

Fonte: adaptada de Silva, 2015.

#### 2.8.8.3. Envase

Uma vez concluída a produção da cerveja, ela está pronta para ser envasada, porém ainda assim, alguns cuidados são necessários, como cuidados com possíveis fontes de

contaminação, perda de gás e contato da cerveja com oxigênio. Tais fatores podem comprometer a qualidade do produto (SANTOS; RIBEIRO, 2005).

É necessário fazer uma limpeza e sanitização das garrafas e tampas para evitar qualquer tipo de contaminação da cerveja. Para diminuir uma possível aeração durante o envase é necessário inclinar a garrafa um pouco de modo que a cerveja escorra pela lateral, e vá até o fundo da garrafa. Logo depois, lacra-se hermeticamente a garrafa com a tampa. É importante que logo após o envase, as garrafas sejam armazenadas em pé e em temperatura próxima à de fermentação e sem contato com a luz, por aproximadamente 15 dias (SILVA, 2015).

## **2.9. Reologia de fluidos alimentícios**

Um dos precedentes sobre estudos do comportamento reológico dos materiais foi Isaac Newton. Em 1687, ele determinou experimentalmente e matematicamente, a definição de viscosidade como a resistência ao deslizamento de suas moléculas devido à fricção interna (MALKIN; ISAYEV, 2022). Ainda que datem desta época, o conhecimento desta ciência foi difundido apenas em 1929 com a criação da Sociedade Americana de Reologia, com Eugene C. Bingham que definiu a terminologia da palavra reologia, como “tudo escoar” (STEFFE, 1996).

O termo reologia é derivado do termo grego “rheos” que significa fluir. Sendo o estudo do escoamento e deformação dos materiais. É a ciência que estuda a resposta dos materiais à aplicação de uma tensão ou deformação externa. Utilizada com o intuito de estabelecer o comportamento de soluções, suspensões e misturas, estudando a sua deformação e o fluxo de matéria (FAUSTINO et al., 2015; MALKIN; ISAYEV, 2022). Presente desde a mecânica dos fluidos newtonianos até a elasticidade de Hooke (BIRD; STEWART; LIGHTFOOT, 1960).

O objetivo da determinação reológica é quantificar as conexões entre as tensões, as deformações e as propriedades reológicas resultantes como a viscosidade, a elasticidade ou a viscoelasticidade (EVARISTO-FERREIRA, 2005; MALKIN; ISAYEV, 2022).

A viscosidade, resultante do estudo reológico de alimentos líquidos e semilíquidos, integra um parâmetro fundamental para a caracterização do fluido (DEHGHANNEJAD et al., 2013). Os reogramas ou curvas de fluxo diferenciam fluidos através da interação entre a tensão de corte ou de cisalhamento e a velocidade de corte ou de cisalhamento.

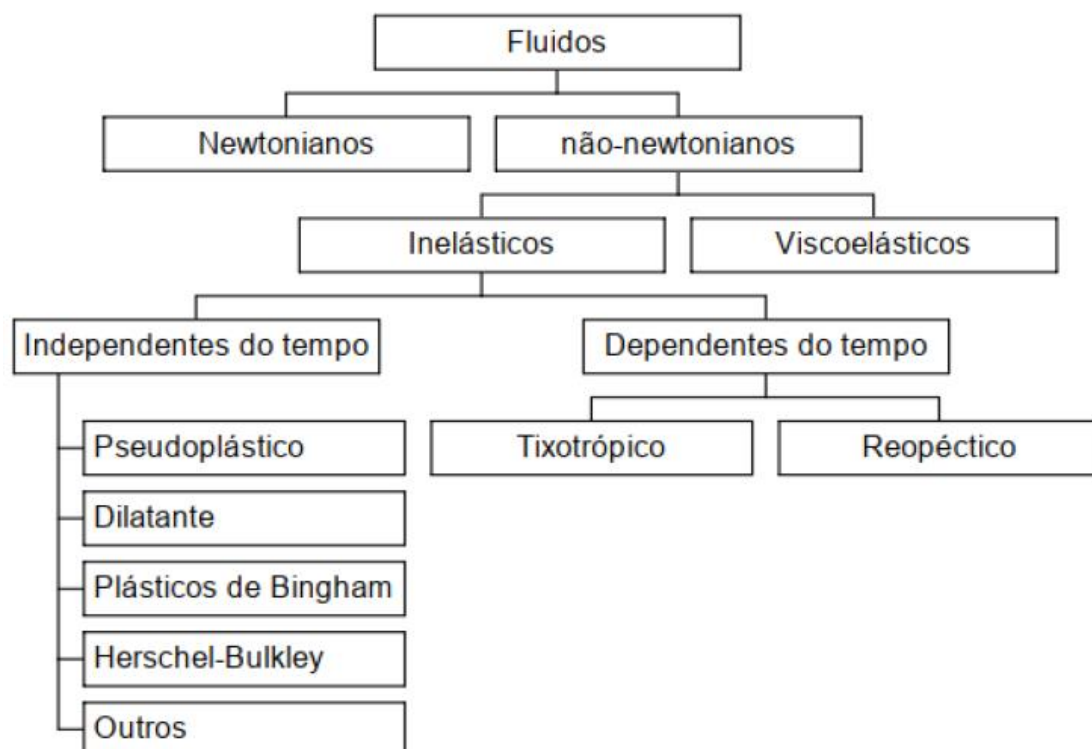
A tensão de cisalhamento ( $\tau$ ) é a força (F) aplicada tangencialmente em uma área (A), fundamental para manter o escoamento do fluido. A velocidade do fluxo é sustentada com uma

força constante e é contida pela resistência interna do líquido, ou seja, por sua viscosidade (MALKIN; ISAYEV, 2022).

O estudo das propriedades reológicas para a compreensão do comportamento de escoamento é necessário na indústria de alimentos. As medidas ou previsões das propriedades reológicas de alimentos são úteis no cálculo de projetos de equipamentos (bombas, misturadores, evaporadores, trocadores de calor, entre outros), medições de estabilidade de armazenamento e processamento, controle de qualidade, para melhorar e otimizar o processo de produção, em previsão de textura, projetar estratégias de embalagem e armazenamento (STEFFE, 1996; FELLOWS, 2006).

O fluido é uma substância que se deforma continuamente sob a ação de uma tensão de cisalhamento e na ausência não haverá deformação. De modo geral, estes fluidos são classificados de acordo com a relação entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação como Newtonianos e não Newtonianos, como apresentado na Figura 10 (STEFFE, 1996).

Figura 10 – Classificação do comportamento reológico de fluidos.



Fonte: TONELI; MURR; PARK, 2005.

Nos fluidos Newtonianos a relação entre a taxa de cisalhamento e a tensão de cisalhamento resulta em uma constante caracterizada pela resistência que o fluido oferece ao escoamento, denominada Lei de Newton da Viscosidade, como mostra a equação (1). A viscosidade newtoniana ( $\mu$ ) é influenciada pela temperatura e pela composição do fluido, quanto maior a viscosidade maior será a resistência ao escoamento (CASTRO et al., 2001).

$$\sigma = \mu \dot{\gamma} \quad (1)$$

Em que:

$\sigma$  = tensão de cisalhamento [ $Pa$ ] = [ $N/m$ ]<sup>2</sup>

$\mu$  = constante de proporcionalidade ou viscosidade absoluta [ $Pa \cdot s$ ]

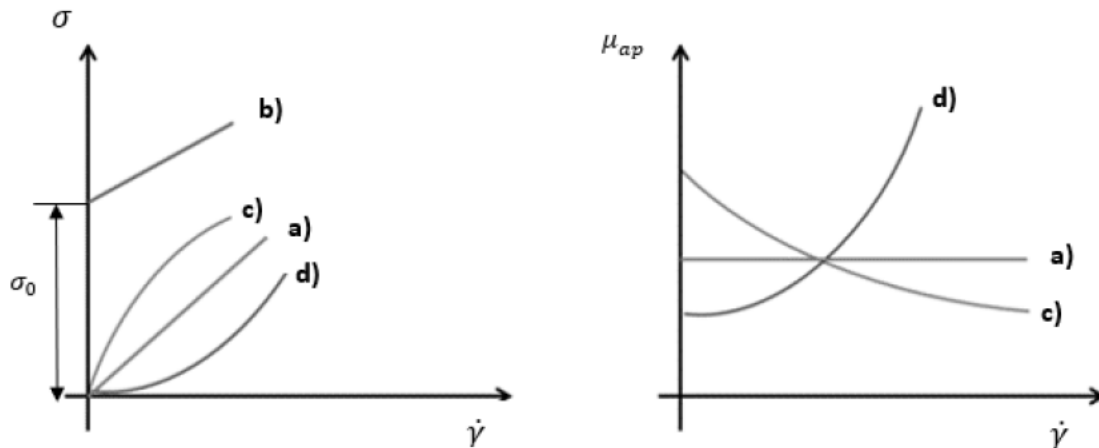
$\dot{\gamma}$  = taxa de deformação [ $s^{-1}$ ]

Exemplos de fluidos newtonianos são: água, soluções de sacarose, leite, suco de maçã, suco de laranja, óleos, vinho e óleo vegetal (TELIS-ROMERO E DITCHFIELD, 2016). A cerveja tem um comportamento quase idealmente viscoso e, portanto, é newtoniano (STEFFE, 1996).

Nos fluidos não-Newtonianos a viscosidade pode variar com o tempo e com as condições de escoamento. A maioria dos fluidos na indústria de alimentos apresenta este comportamento. Além disso, a maioria dos fluidos alimentícios apresentam comportamento pseudoplástico, onde a viscosidade é independente do tempo e diminui com o aumento da taxa de deformação.

Os fluidos não-newtonianos possuem uma relação matemática não linear e podem ser classificados como independentes do tempo e dependentes do tempo. Ainda, os independentes do tempo são classificados em dilatantes, pseudoplásticos, plásticos de Bingham, entre outros. Já os dependentes do tempo são divididos em tixotrópico e reopético (MALKIN; ISAYEV, 2022) (Figura 9). Para os fluidos denominados tixotrópicos, a viscosidade diminui com o tempo a uma taxa de deformação fixa. Contudo, nos fluidos reopéticos ocorre o inverso, deste modo a viscosidade aumenta (Cabral, 2008). Os reogramas dos diferentes tipos de escoamento detalhado na Figura 11.

Figura 11 – Reogramas e viscosidade aparente do comportamento de fluidos não newtonianos independentes do tempo.



a) Newtoniano; b) Plásticos de Bingham; c) Pseudoplásticos; d) Dilatantes.

Fonte: TONELI; MURR; PARK, 2005.

O reograma de um fluido newtoniano é uma linha reta que passa através da origem e tem uma inclinação, percebe-se que quanto maior a inclinação, maior será a viscosidade do material, denominada viscosidade absoluta (Figura 10a). Os pseudoplásticos (fluidos frequentes na indústria de alimentos) caracterizam-se com a diminuição da viscosidade aparente de modo que aumenta a taxa de cisalhamento (Figura 10c).

Para descrever as propriedades da maioria dos alimentos fluidos utiliza-se modelos matemáticos, sendo os mais comuns: Newton, Ostwald-de-Waele, Plástico de Bingham, Herschel-Bulkley e Casson.

Dentre estes, a função de viscosidade de Ostwald-de-Waele (Lei da Potência) é uma das utilizadas para adequar os dados de viscosidade dos materiais plásticos, dado pela Equação 2 (GUEDES, et al., 2010).

$$\sigma = k (\dot{\gamma})^n \quad (2)$$

Onde

$\sigma$  = tensão de cisalhamento  $[Pa] = [N.m]^{-2}$

$k$  = índice de consistência  $[Pa \cdot sn]$

$\dot{\gamma}$  = taxa de deformação  $[s^{-1}]$

$n$  = índice de comportamento do fluido  $[adimensional]$

Quando o comportamento do fluido indica  $n = 1$ , essa equação se reduz para a Lei de Newton da viscosidade, com  $\kappa = \mu$ . Assim, o desvio de “ $n$ ” da unidade indica o grau de desvio do comportamento newtoniano, sendo que, se  $n < 1$  o comportamento é pseudoplástico e, se  $n > 1$  o fluido é dilatante.

Nos fluidos dilatantes, a viscosidade aparente aumenta com o acréscimo da taxa de cisalhamento (Figura 10d), ambos representados na Eq. 3.

$$\mu_{ap} = k(\dot{\gamma})^{n-1} \quad (3)$$

$\mu_{ap}$  = viscosidade aparente [Pa. s]

Quando são independentes do tempo e se apresenta inerte devido a altas forças de interações intermoleculares, dando a substância um caráter sólido, que o impede de fluir, não são representados pelo modelo Lei da Potência, sendo necessária a aplicação de uma tensão inicial mínima para que o material comece a fluir (Figura 10b). Este comportamento é caracterizado pela equação 5.

Em vista disso, o modelo de Bingham (Equação 4) representa o comportamento apresentado pelos fluidos classificados como Plásticos de Bingham, em que  $\mu_{pl}$  é a viscosidade plástica. A viscosidade aparente diminui com o aumento da taxa de cisalhamento (Equação 5). Onde, os Plásticos de Bingham caracterizam-se por apresentarem uma tensão residual, abaixo da qual se comportam como sólidos. Para tensões superiores à tensão residual, no entanto, os fluidos apresentam um comportamento newtoniano.

$$\sigma = \sigma_0 + \mu_{pl}\dot{\gamma} \quad (4)$$

$$\mu_{ap} = \mu_{pl} + \sigma_0/\dot{\gamma} \quad (5)$$

Em que:

$\sigma$  = tensão de cisalhamento [Pa] = [N/m<sup>2</sup>]

$\mu_{ap}$  = viscosidade aparente [Pa. s]

$\sigma_0$  = tensão de cisalhamento inicial [Pa] = [N/m<sup>2</sup>]

$\dot{\gamma}$  = taxa de deformação [s<sup>-1</sup>]

$\mu_{pl}$  = viscosidade plástica de Bingham [Pa. s]

$n$  = índice de comportamento do fluido [adimensional]

Outro modelo definido para este comportamento é o modelo de Herschel-Bulkley. Uma forma modificada do modelo proposto por Ostwald-De-Waele, conforme ilustra a equação (6). Este modelo difere da Lei da Potência apenas pela existência da uma tensão residual ( $\sigma_0$ ), ou seja, uma vez que a tensão aplicada ao fluido ultrapasse o valor da tensão residual, o material passa a se comportar de acordo com o modelo da Lei da Potência (TONELI, MURR, PARK, 2005).

$$\sigma - \sigma_0 = k (\dot{\gamma})^n \quad (6)$$

De acordo com Telis-Romero e Ditchfield (2016), na indústria os alimentos são submetidos a diferentes temperaturas e condições de processamento. Portanto, obter uma relação que descreva a dependência da temperatura com a viscosidade aparente ou newtoniana é de extrema importância. A quantificação do efeito da temperatura sobre a viscosidade aparente ou newtoniana pode ser descrita pela linearização (Equação 8) da Equação do tipo Arrhenius (Equação 7).

$$\eta_{ap} = \eta_{\infty} \exp(-E_a/RT) \quad (7)$$

$$\ln(\eta_{ap}) = \ln(\eta_{\infty}) - (E_a/R)(1/T) \quad (8)$$

onde:

$\eta_{ap}$  = viscosidade aparente do fluido [Pa. s]

$\eta_{\infty}$  = constante empírica [Pa. s]

$E_a$  = energia de ativação [J/mol]

R = constante universal dos gases [8,314 J/K mol]

$E_a$  = energia de ativação [J/mol]

T = temperatura absoluta do fluido [K]

A energia de ativação representa a sensibilidade da variação da viscosidade em função da temperatura, quanto maior o valor da energia de ativação, maior será a mudança no valor da viscosidade com a temperatura (STEFFE, 1996). Nos fluidos não-newtonianos, é possível observar que com o aumento da temperatura ocorre a diminuição do índice de consistência, enquanto o índice de fluxo é pouco influenciado (TELIS-ROMERO; DITCHFIELD, 2016).

A concentração de sólidos é um fator que também afeta os parâmetros reológicos. Na indústria de alimentos a dependência da concentração com a viscosidade aparente ou newtoniana é determinada pelo modelo potencial (Equação 9) ou pelo modelo exponencial (Equação 10).

$$\mu_{ap} = A_0 C^{B_0} \quad (9)$$

$$\mu_{ap} = A_0 \exp(B_0 \times C) \quad (10)$$

onde:

$\mu_{ap}$  = viscosidade aparente do fluido [Pa. s];

$A_0$  e  $b_0$  = constante empírica [Pa. s];

$C$  = concentração de sólidos [°P].

Para os fluidos newtonianos o aumento da concentração de sólidos provoca o aumento da viscosidade. Em fluidos não-newtonianos o aumento da concentração de sólidos provoca acréscimo no índice de consistência no modelo de Ostwald-de-Waele e na viscosidade binghamiana (TELIS- ROMERO; DITCHFIELD, 2016).

Em relação a produção de cerveja, uma das propriedades físicas mais críticas é a viscosidade. A viscosidade precisa ser monitorada em diversas operações da produção da cerveja, tornando-se uma aplicação usada para o rastreamento da qualidade do malte fornecido, determinação da qualidade do malte e do mosto, monitoramento de filtração e avaliação do produto final. A viscosidade também desempenha um papel importante na teoria da filtração e precisa ser levada em consideração para projetar os filtros e definir as pressões de trabalho. Uma alta viscosidade faz a filtração da cerveja ser mais difícil e pode levar a turvações de amido na cerveja final (LOWE et al., 2005).

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

Os procedimentos metodológicos adotados neste trabalho foram: um levantamento teórico sobre o tema, a definição das quatro receitas, a sua produção e o estudo reológico.

#### 3.1. Local da pesquisa

As cervejas tipo *American Barleywine* foram produzidas no Departamento de Engenharia de Alimentos no Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas/UNESP,

Campus de São José do Rio Preto/SP, durante o ano de 2022. A bebida foi preparada de maneira artesanal, utilizando os equipamentos descritos no item 3.3.

As análises foram realizadas no laboratório de Medidas Físicas no Departamento de Engenharia de Alimentos no Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas - UNESP, Campus de São José do Rio Preto/SP.

### 3.2. Amostragem

Uma vez que o intuito desta pesquisa foi avaliar e correlacionar a influência de parâmetros distintos na reologia do mosto cervejeiro e da cerveja finalizada, como tempo de mosturação e a presença de lúpulo foi necessário a coleta de um total de 9 amostras, em diferentes etapas do processo de fabricação da cerveja *American Barleywine*, conforme esquematizado na Tabela 7. Para cada amostra foram coletados 0,5 litros para as análises reológicas e 1 L para análise físico-química.

Tabela 7 – Amostras de mosto e da cerveja estilo *American Barleywine* que foram selecionadas para as análises físico-químicas e reológicas.

| Cerveja   | Tipo de mosturação  | Amostragem             |
|-----------|---------------------|------------------------|
| Cerveja A | Mosturação Reduzida | Sem lúpulo pré-fervura |
| Cerveja A | Mosturação Reduzida | Com lúpulo pré-fervura |
| Cerveja A | Mosturação Reduzida | Cerveja pronta         |
| Cerveja B | Mosturação Padrão   | Sem lúpulo pré-fervura |
| Cerveja B | Mosturação Padrão   | Com lúpulo pré-fervura |
| Cerveja B | Mosturação Padrão   | Cerveja pronta         |
| Cerveja C | Mosturação Elevada  | Sem lúpulo pré-fervura |
| Cerveja C | Mosturação Elevada  | Com lúpulo pré-fervura |
| Cerveja C | Mosturação Elevada  | Cerveja pronta         |

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

### 3.3. Equipamentos

Os equipamentos utilizados para produção artesanal da cerveja foram:

- 01 caldeirão de alumínio com capacidade para 50 L;
- 01 caldeirão de alumínio com capacidade para 50 L com torneira;

- 01 caldeirão de alumínio com capacidade para 50 L com torneira e fundo falso de filtração;
- Fogão industrial de bancada;
- Balança analítica;
- Um coador tipo Chinoy (tela metálica fina);
- Um trocador de calor (Chiller de Alumínio);
- Fermentador com capacidade para 30 L com torneira e borbulhador (airlock);
- Termômetro (10°C à 150°C);
- Pá e colher de cervejeiro;
- Escumadeira;
- Refratômetro portátil;
- Um densímetro de massa específica;
- Moinho moedor de cereais;
- Eletrobomba;
- Freezer e BOD com termostato;
- Garrafa para cerveja de 600 ml.
- Arrolhador manual modelo Kelly 26mm

### **3.4. Receita da cerveja *American Barleywine* e suas variações**

#### **3.4.1. Receita base**

A receita utilizada nesta pesquisa foi desenvolvida a partir de uma receita padrão do estilo com o auxílio do software beersmith. É uma receita que se encaixa em todos os parâmetros estabelecidos pelo BJCP Style Guidelines de 2021. A receita utilizada nesta pesquisa está apresentada na Tabela 8.

Tabela 8 – Receita utilizada para a produção de 20 Litros das cervejas *American Barleywine*.

| Descrição dos ingredientes                   | Quantidade (Kg) |
|----------------------------------------------|-----------------|
| Malte agrária Pale Ale (5-7 EBC)             | 10,0            |
| Malte viking Caramel (160 EBC)               | 0,600           |
| Malte viking Caramel (27 EBC)                | 0,360           |
| Malte Crisp Chocolate (900-1100 EBC)         | 0,100           |
| Malte Dingemans Special B (300 EBC)          | 0,100           |
| Lúpulo US Columbus 21 (14,5%)                | 0,070           |
| Lúpulo US Amarillo 20 (10,3%)                | 0,060           |
| Lúpulo US Centennial 20 (10,2%)              | 0,060           |
| Fermento – Fermentis US05 (alta fermentação) | 0,00115         |

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

#### 3.4.2. Variações na produção (mosturação)

No presente estudo, foram produzidas três variações da cerveja *American Barleywine* a partir de modificações na metodologia da produção, sendo tempos diferentes de mosturação (apresentados na Tabela 9), para que seja possível estudar os possíveis efeitos de cada variação na reologia do mosto e do produto.

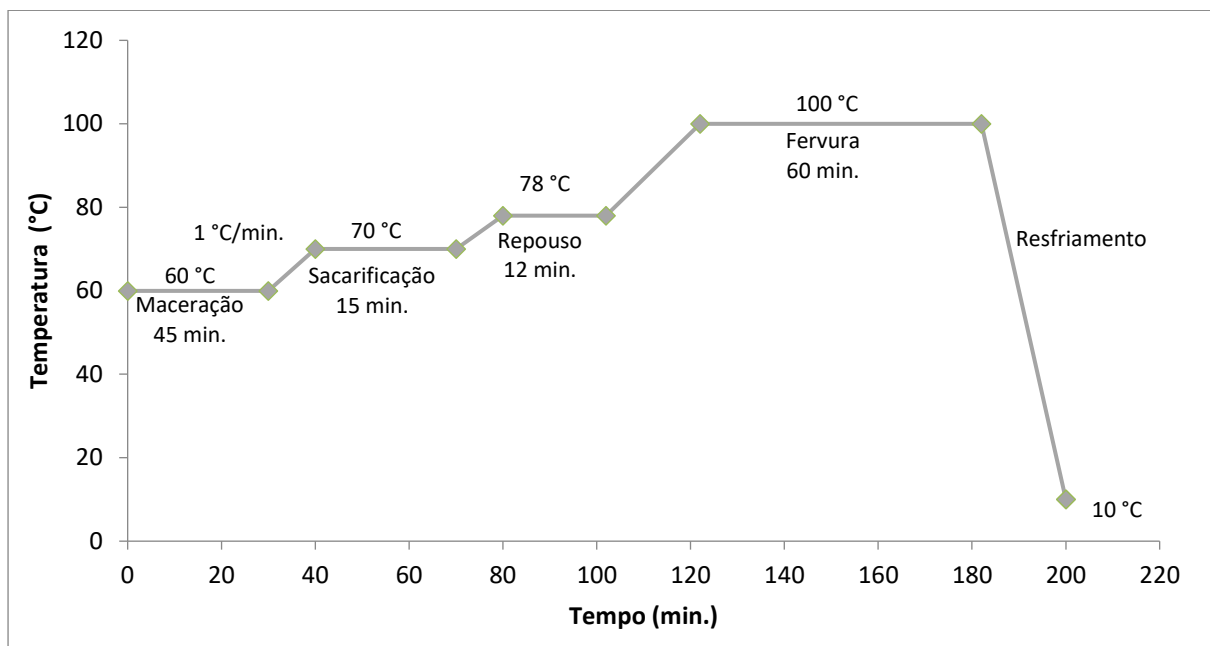
Tabela 9 – Tempos e temperaturas que foram seguidos para a realização da mosturação e sacarificação da cerveja *American Barleywine*.

| Ensaio    | Tipo de Mosturação | Mosturação (min.) em 60 °C | Sacarificação (min.) em 70 °C |
|-----------|--------------------|----------------------------|-------------------------------|
| Cerveja A | Reduzida           | 45'                        | 15'                           |
| Cerveja B | Padrão             | 60'                        | 30'                           |
| Cerveja C | Elevada            | 30'                        | 60'                           |

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

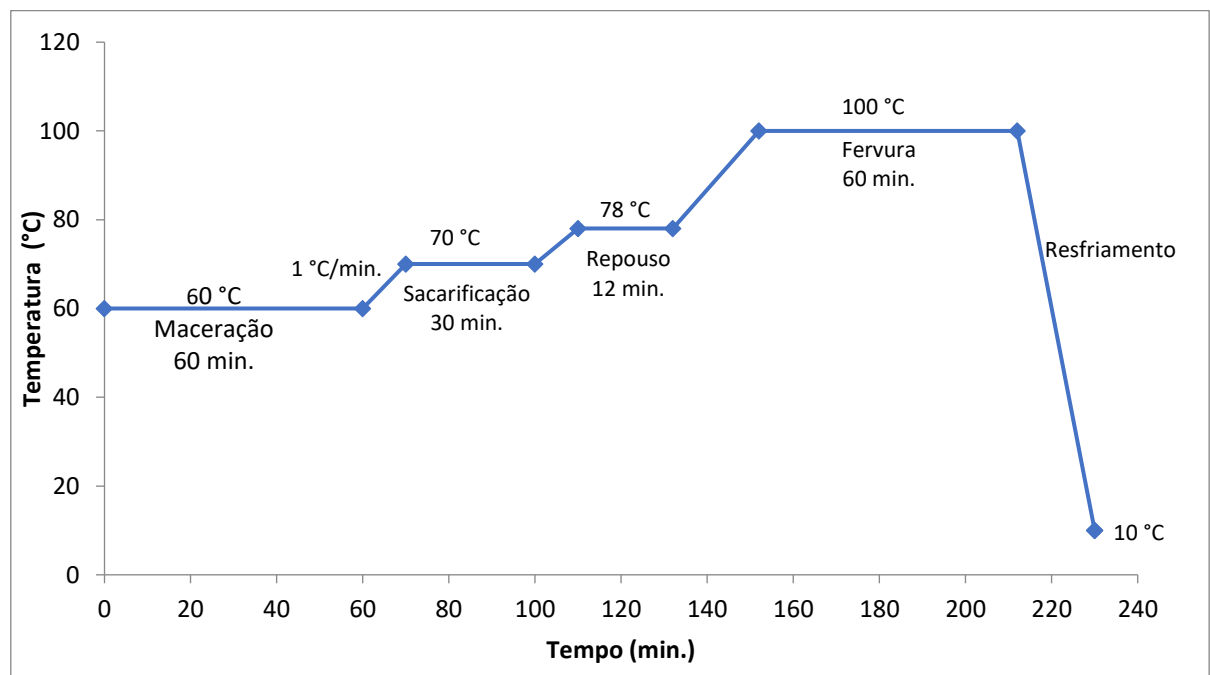
Os procedimentos de aquecimento e resfriamento das cervejas A, B e C mencionadas na Tabela 9, estão apresentados respectivamente, nas Figuras 13, 14 e 15 a seguir.

Figura 12 – Processos de aquecimento e resfriamento durante a produção da cerveja A.



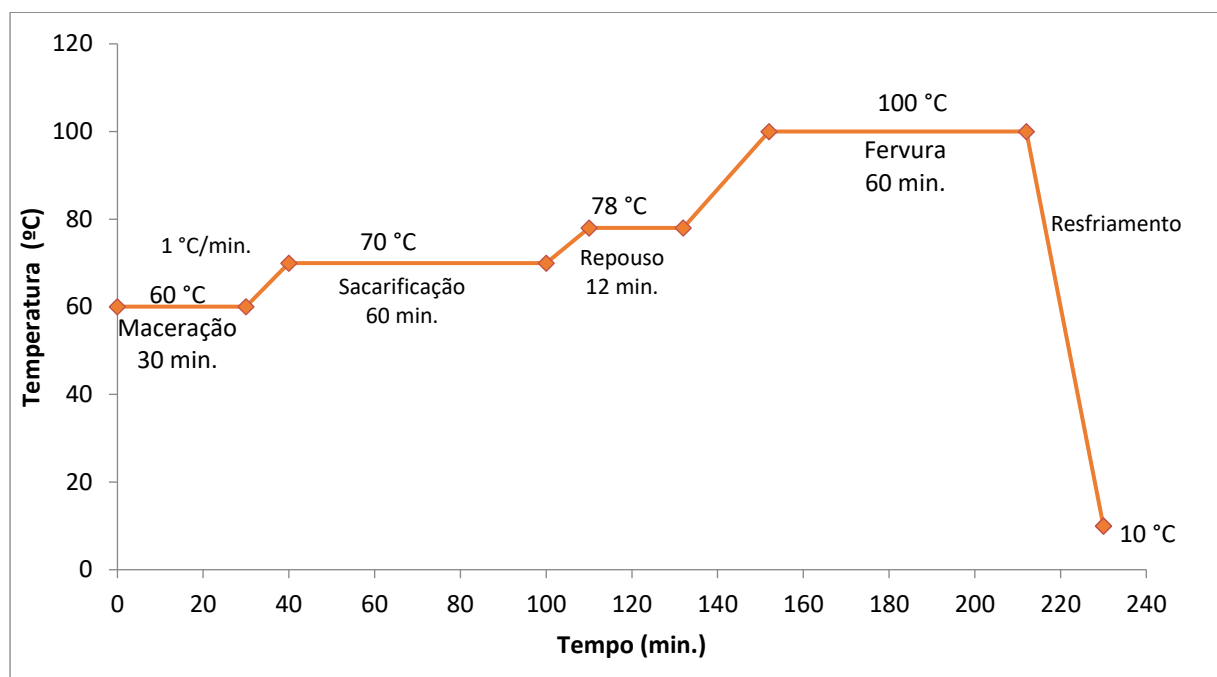
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Figura 13 – Processos de aquecimento e resfriamento durante a produção da cerveja B.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Figura 14 – Processos de aquecimento e resfriamento durante a produção da cerveja C.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

### 3.5. Matérias-primas cervejeiras

As matérias-primas utilizadas no preparo do mosto cervejeiro foram: água tratada, malte de cevada, lúpulo e leveduras. Os produtos foram adquiridos de forma direta, na cidade de São José do Rio Preto.

#### 3.5.1. Água

A água utilizada, tanto para limpeza dos tanques como para a produção da cerveja, foi provida pela rede pública de São José do Rio Preto. Seus parâmetros de qualidade estão apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 – Parâmetros de qualidade da água oriunda da rede pública da cidade de São José do Rio Preto no ano de 2022.

| Mês       | Análises físico-químicas |              |      |              |     | Análises Bacteriológicas |                |              |
|-----------|--------------------------|--------------|------|--------------|-----|--------------------------|----------------|--------------|
|           | Cloro residual (mg/L)    | Flúor (mg/L) | pH   | Turbidez NTU | Cor | Coliformes Totais        | <i>E. Coli</i> | Resultados   |
| Janeiro   | 0,83                     | 0,61         | 9,00 | 0,95         | 1   | Ausente                  | Ausente        | Satisfatório |
| Fevereiro | 0,78                     | 0,61         | 9,01 | 0,88         | 0   | Ausente                  | Ausente        | Satisfatório |
| Março     | 0,80                     | 0,59         | 8,99 | 0,95         | 1   | Ausente                  | Ausente        | Satisfatório |
| Abril     | 0,79                     | 0,60         | 9,02 | 1,02         | 1   | Ausente                  | Ausente        | Satisfatório |
| Maiο      | 0,84                     | 0,60         | 9,04 | 1,18         | 2   | Ausente                  | Ausente        | Satisfatório |
| Junho     | 0,86                     | 0,64         | 7,23 | 0,45         | 0   | Ausente                  | Ausente        | Satisfatório |
| Julho     | 00,91                    | 0,00         | 7,15 | 0,46         | 0   | Ausente                  | Ausente        | Satisfatório |

Fonte: SEMAE, 2022.

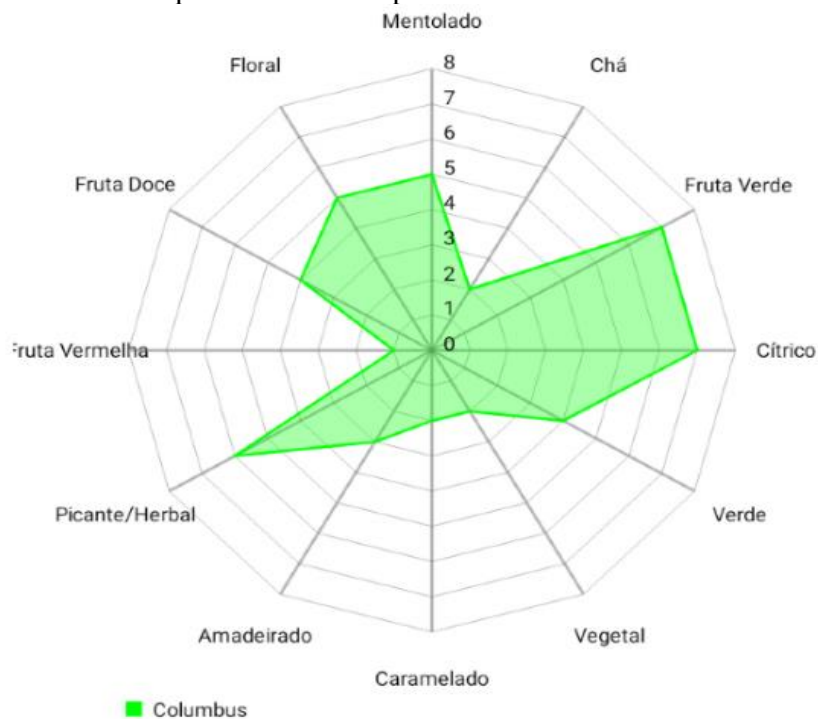
### 3.5.2. Malte de cevada

De acordo com os dados do fabricante, os maltes utilizados nesta pesquisa foram e suas respectivas medidas EBC foram: Malte agrária Pale (5-7 EBC), Malte viking Caramel (160 EBC) e Malte viking Caramel (27 EBC).

### 3.5.3. Lúpulo

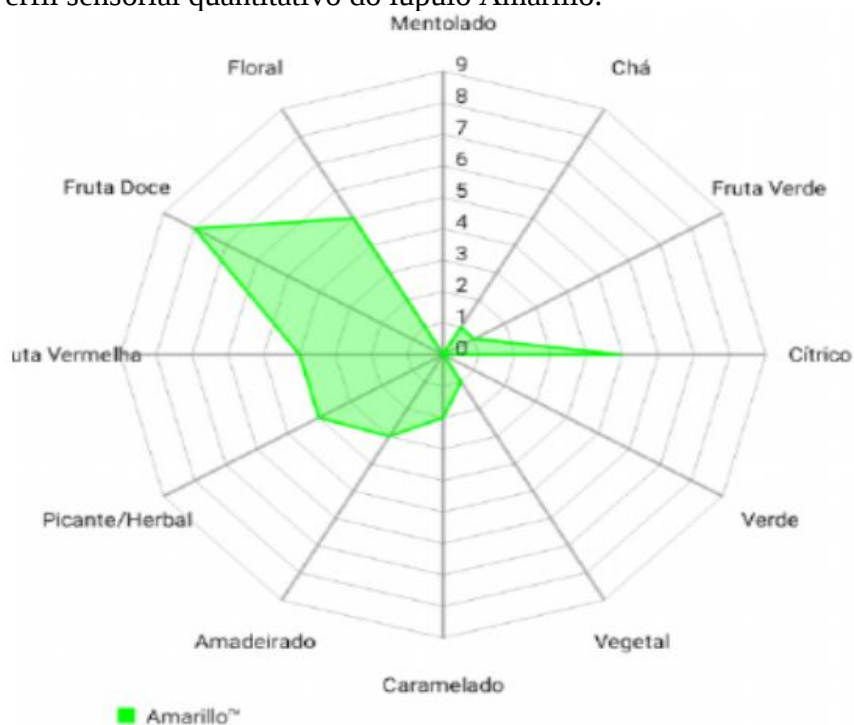
Os lúpulos utilizados nesta receita são: Columbus, amarillo e centennial, em forma de pellet. Todos são de origem dos Estados Unidos, enquanto que o lúpulo Columbus e centennial possuem função dual de aroma e amargor e o amarillo apenas de aroma. Nas Figuras 15, 16 e 17 é possível identificar o perfil sensorial dos lúpulos e na Tabela 11 a descrição das propriedades analíticas e composição de óleos totais.

Figura 15 – Perfil sensorial quantitativo do lúpulo Columbus.



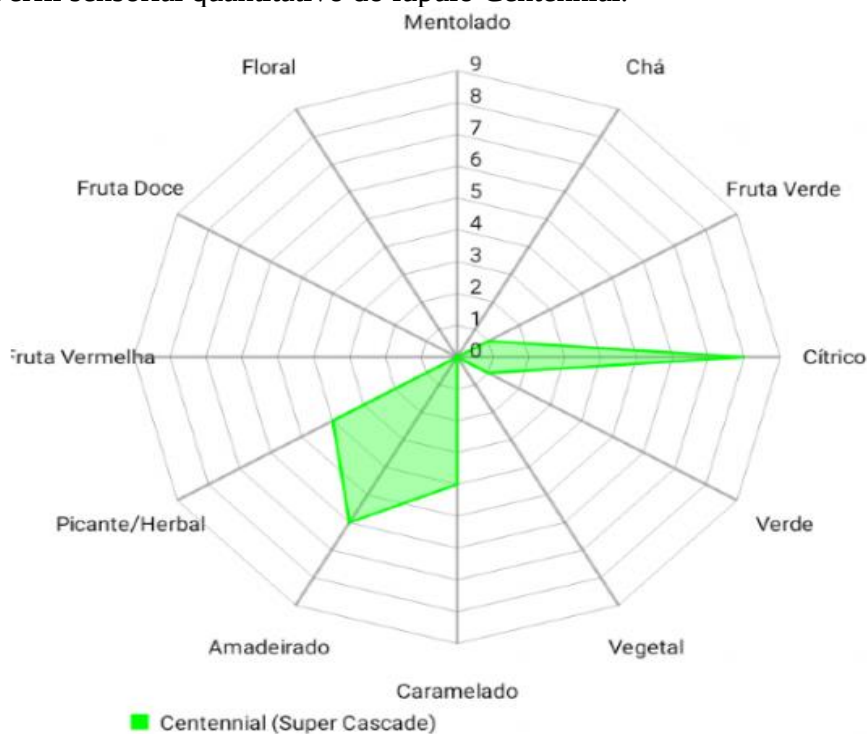
Fonte: ARMAZÉM CERVEJEIRO, 2022.

Figura 16 – Perfil sensorial quantitativo do lúpulo Amarillo.



Fonte: ARMAZÉM CERVEJEIRO, 2022.

Figura 17 – Perfil sensorial quantitativo do lúpulo Centennial.



Fonte: ARMAZÉM CERVEJEIRO, 2022.

Tabela 11 – Propriedades e composição dos lúpulos Columbus, Amarillo e Centennial.

| Atributos  | Ácido alfa (%) | Ácido beta (%) | Óleos totais (ml/100) | Cohumulona (%) | Mirceno (%) | Humuleno (%) | Cariofileno (%) | Farseno (%) |
|------------|----------------|----------------|-----------------------|----------------|-------------|--------------|-----------------|-------------|
| Columbus   | 15-17          | 4-5            | 2,5-3,5               | 28-38          | 25-55       | 9-25         | 6-12            | <1          |
| Amarillo   | 8-11           | 6-7            | 1,5-1,9               | 21-24          | 68-70       | 9-11         | 2-4             | 2-4         |
| Centennial | 9-11           | 3-4            | 1,5-2,5               | 28-30          | 45-55       | 10-18        | 5-8             | <1          |

Fonte: ARMAZÉM CERVEJEIRO, 2022.

#### 3.5.4. Levedura

Foi utilizado um pacote de levedura *Fermentis* US-05, com 11,5g. É uma levedura do tipo ale americana de caráter neutro, sem ésteres e de alta tolerância ao álcool.

### 3.6. Procedimento experimental

O processo de produção da cerveja foi feito em várias etapas de acordo com a Figura 9 e diferentes mosturações de acordo com as Figuras 13, 14 e 15.

Vale ressaltar que, o processo descrito a seguir é o método tradicional de produção artesanal que será aplicado a cerveja 1 (mosturação tradicional) e apenas terá diferença do processo das outras cervejas em relação ao tempo de cozimento do mosto durante a brassagem (conforme apresentada na Tabela 9).

### 3.6.1. Brassagem

#### 3.6.1.1. Moagem

O processo de produção da cerveja inicia-se pela higienização de todos equipamentos e utensílios a serem utilizados e pode-se destacar como primeira etapa da produção, o preparo do malte, que deverá ser triturado a seco em um moinho de grãos manual de dois cilindros.

#### 3.6.1.2. Mosturação

Para início do processo de cozimento do mosto, são aquecidos 25 litros de água em uma panela (água primária) e outros 35 litros em outra (água secundária). Conforme a receita apresentada na Tabela 11, foram utilizados um total de cinco maltes, sendo eles 10,0 kg do Malte Agrária Pale Ale (5 - 7 EBC), 0,6 kg do Malte Viking Caramel (160 EBC), 0,3 kg do Malte Viking Caramel (27 EBC), Malte Crisp Chocolate (900-1100 EBC) e Malte Dingemans Special B (300 EBC) previamente triturados. O malte deverá ser misturado e adicionado a 25,0 L de água (denominada água primária) já aquecida a 60 °C na tina de mosturação e deverá permanecer nesta temperatura durante 60 min. com agitação ininterrupta.

A tina de mosturação consistiu em uma panela de 50 L onde o mosto foi mantido em agitação com o uso de uma pá cervejeira, em um sistema de aquecimento de fogão industrial de bancada, com controlador e indicador de temperatura digital (fixado na panela).

Passados os primeiros 60 minutos de cozimento, a temperatura da mistura foi aquecida elevando-se em rampa de um grau por minuto até a 70 °C, onde, o mosto permanecerá nesta temperatura por mais 30 min. para ocorrer a completa sacarificação do amido pela ação das enzimas  $\alpha$  e  $\beta$ -amilases, que atuam hidrolisando o amido e a amilopectina para liberar os açúcares fermentáveis, seguindo a curva apresentada na Figura 13.

Ao final da mosturação, a temperatura é elevada a 78 °C por 12 min. em repouso, então, quando as enzimas já estiverem inativas será realizado o teste de iodo para confirmação da sacarificação do amido. A mudança da coloração de roxo-azulada para o amarelo claro indica a completa hidrólise do amido presente no mosto.

#### 3.6.1.3. Filtração/clarificação

Em seguida deve se assegurar que a água secundária na temperatura correta de 75 °C, pois será utilizada durante o processo de filtração do bagaço do malte ou também conhecido como clarificação do mosto cervejeiro, com o objetivo de separar as cascas e demais resíduos sólidos do mosto líquido clarificado por meio de um processo de lavagem do bagaço do malte.

Inicia-se então o processo de recirculação, no qual o mosto é filtrado pelas próprias cascas do malte para a obtenção de um líquido mais límpido, ou seja, clarificado. Nessa etapa do processo, o mosto é retirado pela válvula ao fundo da tina de mosturação e devolvido ao topo utilizando uma escumadeira como obstáculo para não causar problemas com a sedimentação.

A filtração acontece naturalmente por sedimentação e a remoção do mosto limpo será efetuada por gravidade com a passagem do líquido através da camada de cascas e bagaço do malte depositadas no fundo falso tipo peneira da panela de filtração, constituindo o mosto primário.

Então, a camada filtrante (cascas e bagaço do malte) será lavada três vezes pela passagem da água secundária (a 75 °C), em cada passagem, lavando o bagaço e as cascas do malte de cevada para aproveitar o açúcar que ficará dissolvido e retido, de modo que, quando o resíduo se apresenta com menos de 1% de extratos solúveis, é considerado como totalmente esgotado.

Com o mosto clarificado, após a filtração, será analisada a concentração em graus Brix, então, amostras de 800 mL serão coletadas do mosto e acondicionadas em garrafas pets esterilizadas. Para em seguida, promover o processo de fervura e fermentação do mosto e sucessivamente o acabamento (maturação) e envase da cerveja *American Barleywine*.

#### 3.6.1.4. Fervura

Depois do processo de maceração e mosturação do mosto, e a coleta das amostras, finalmente se dará o processo de fervura, responsável pelo desenvolvimento de sabores da cerveja e eliminação de compostos indesejáveis e *off flavors*, essa etapa será mantida por 60 min., sendo que, no 01min. de fervura serão adicionados 0,07 kg do lúpulo US Columbus em pellets, aos 60 min. de fervura, serão adicionados 0,06 kg de US Amarillo e 0,06 kg de Lúpulo US Centennial.

#### 3.6.1.5. Whirlpool

Sucessivamente, será realizado o whirlpool (técnica de resfriamento do mosto que ajuda a remover partículas em suspensão) durante 10 min. através da agitação do mosto em sentido anti-horário, utilizando uma colher de cervejeiro e posterior repouso por mais 15 min. para decantação dos sedimentos. Ao término do tempo de repouso, o mosto será retirado pela parte inferior e resfriado por um trocador de calor de placas, até a temperatura de 10 °C. O resfriamento deve ser feito rapidamente em condições assépticas para interromper as reações químicas que ocorrem no mosto.

#### 3.6.1.6. Oxigenação

Antes de resfriar o mosto, é realizada a oxigenação dele através da recirculação do líquido, que é retirado pela torneira ao fundo e devolvido ao topo, sendo despejado ao topo em cima de uma colher de cervejeiro com o intuito de criar bolhas de ar.

#### 3.6.1.7. Resfriamento

Após a retirada do trub e posterior oxigenação, o mosto está pronto para ser resfriado com o uso de um trocador de calor de placas, até a temperatura de 10 °C

#### 3.6.1.8. Fermentação

Para o processo de fermentação o mosto será transferido para um fermentador com *airlock* e será utilizada uma levedura conhecida como fermento cervejeiro de alta fermentação, a SAF Ale US 05 e permanecerá durante 7 dias em temperatura controlada de 18 °C.

#### 3.6.1.9. Acabamento

##### 3.6.1.9.1. Maturação

Ao término do período de fermentação os recipientes serão deixados em temperatura de 0 °C, por mais um período de 15 dias, correspondendo a etapa de maturação, para deposição e compactação das leveduras para posterior envase.

##### 3.6.1.9.2. Carbonatação (*priming*)

A carbonatação da cerveja é realizada através do *priming*, que consistiu na adição de açúcar cristal a cerveja na quantia obtida através do cálculo de 6g por litro de cerveja. A

quantidade de açúcar é misturada com aproximadamente 300ml de água e a solução é fervida para criar a solução de açúcar invertido.

#### 3.6.1.9.3. Envase

Para o envase da cerveja são usadas garrafas âmbar de vidro com 600ml e tampas de alumínio do modelo *pry-off*, ambas higienizadas e esterilizadas com álcool 70. A cerveja é envasada de modo que escorra pela lateral da garrafa, sem turbulência.

A cerveja é rapidamente envasada e a tampa é colocada e fixada com o uso de um arrolhador manual modelo Kelly 26mm. A cerveja envasada deve ser armazenada em pé e em temperatura próxima a de fermentação, e sem contato com a luz, por em média 20 dias.

### 3.7. Determinações analíticas

#### 3.7.1. Medidas reológicas

##### 3.7.1.1. Propriedades Reológicas

As medições reológicas foram realizadas utilizando-se um reômetro rotacional modelo AR 2000 (TA Instruments, New Castle, England) acoplado com cilindros de geometria concêntricos (cilindro interno de 42 mm × 28 mm; cilindro externo de 78,5 mm × 30,15 mm) com 5920 µm de distância (gap) entre os cilindros, com controle tensão e temperatura. A taxa de cisalhamento variou de 1,0 s<sup>-1</sup> a 500 s<sup>-1</sup> em dez temperaturas diferentes (10, 25, 50 e 80 °C) para o mosto e após a finalização da cerveja.

##### 3.7.1.2. Análise dos dados reológicos

Os modelos reológicos de Newton, Ostwald-de-Waele (Lei da Potência) e Bingham serão ajustados para a dependência da taxa de cisalhamento na tensão de cisalhamento e dos parâmetros reológicos obtidos nas temperaturas e concentrações testados, estes serão obtidos por procedimento de estimativa não linear implementado no software STATISTICA (STATSOFT, 2007), minimizando a soma dos quadrados dos erros. A confiabilidade das equações será avaliada pelo número de parâmetros, coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>) e análise de resíduos. Para os modelos matemáticos de Newton (um parâmetro); Ostwald-de-Waele/Power-Law e Bingham (dois parâmetros); e de Herschel-Bulkley (três parâmetros).

Tabela 12 – Modelos reológicos utilizados nos ajustes matemáticos.

| Modelo           | Equação                        |
|------------------|--------------------------------|
| Newtoniano       | $\tau = \mu\gamma$             |
| Ostwald-de-Waele | $\tau = k (\gamma)^n$          |
| Bingham          | $\tau = \tau_0 + k\gamma$      |
| Herschel-Bulkley | $\tau = \tau_0 + k (\gamma)^n$ |

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Onde  $\tau$  é a tensão de cisalhamento (Pa);  $\gamma$  é a taxa de deformação ( $s^{-1}$ );  $k$  é o coeficiente de consistência (mPa.s), e  $n$  é o índice de comportamento reológico (adimensional).

Os resultados da viscosidade serão submetidos aos modelos matemáticos que descrevem a relação entre viscosidade, temperatura e concentração, sendo estes, equação do tipo Arrhenius para variação da viscosidade em função da temperatura com a concentração constante, modelo exponencial e potencial para variação da concentração com a temperatura constante e modelo de efeito combinado entre temperatura e concentração.

A confiabilidade e a consistência do modelo escolhido serão avaliadas pelo número de parâmetros, coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e erro médio relativo.

### 3.8. Métodos analíticos

#### 3.8.1. Determinação do pH

O pH foi determinado utilizando o potenciômetro pHmetro Thermo Scientific, modelo Orion 3 Star, a temperatura de 20 °C (AOAC, 2005).

#### 3.8.2. Cor

A cor foi determinada em unidades de EBC a partir do método 9.2 descrito pela AOAC (AOAC, 2000).

#### 3.8.3. Álcool (%)

O método descrito em (v/v) % a partir do método 9.2.6 da AOAC (AOAC, 2008).

#### 3.8.4. Teor de compostos fenólicos

A concentração de compostos fenólicos foi determinada pelo método de Folin-Ciocalteu, por leituras de absorbância no comprimento de onda de 755 nm.

Onde, uma amostra de 0,5 mL foi misturada com 0,5 mL de reagente de Folin-Ciocalteu e 7,5 mL de água destilada. A mistura ficou em repouso por 10 min., à temperatura ambiente no escuro. Depois foram adicionados 1,5 mL de carbonato de sódio (20%), as amostras ficaram em repouso novamente, por 20 min., a 40 °C. A quantificação foi por uma curva de calibração utilizando ácido gálico como padrão de identificação.

#### 3.8.5. °Brix

Foi determinado usando um refratômetro portátil (Atago Co, Ltd.) calibrado para análises realizadas a 20 °C. Os resultados foram expressos em °Brix (AOAC, 2012).

#### 3.8.6. Amargor

Foi realizado a partir do método 9.8 presente na AOAC e descrito em unidade de IBU (AOAC, 2020).

#### 3.8.7. Densidade Original e Final

As densidades foram analisadas com o uso de um densímetro Anton Paar DMA 4500.

#### 3.8.8. Acidez Total Titulável

A acidez total foi determinada por titulação com solução de hidróxido de sódio 0,05M (normalizado) e fenolftaleína como indicador (3 gotas), utilizando 10 mL de amostra e 100 mL de água destilada (AOAC, 2012).

Para determinação da acidez fixa, 10 mL de cada amostra foram adicionados em cápsulas de porcelana, seguido de aquecimento em banho-maria fervente. O procedimento de evaporação foi realizado 3 vezes, para atingir um volume total de 30 mL. Após, alcançou-se a temperatura ambiente das amostras e foram adicionados 50 mL de água destilada. A titulação foi realizada da mesma forma que para a acidez total.

A acidez volátil foi obtida pela diferença entre a acidez total e a acidez fixa. Os resultados foram expressos em gramas de ácido acético por 100 ml de amostra. Todas as determinações realizadas em triplicata.

### **3.9. Análise Estatística**

A confiabilidade e a consistência do modelo foram avaliadas através da análise coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e erro médio relativo.

## **4. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **4.1. Análises físico-químicas das Cervejas finais produzidas no estilo Barleywine**

As cervejas do estilo Barleywine são caracterizadas por serem cervejas densas, encorpadas e com alta viscosidade. Isso ocorre porque essas cervejas contêm uma grande quantidade de malte para aumentar a concentração de açúcares e outros componentes solúveis na cerveja, tornando-a mais espessa e viscosa. Além disso, as cervejas desse estilo geralmente possuem um teor alcoólico elevado, o que pode contribuir para uma sensação de maior corpo e viscosidade na boca (BJCP, 2015; GRIBKOVA et al., 2022).

Barleywine é um estilo de cerveja forte, que se caracteriza por um elevado teor alcoólico e um sabor maltado intenso (OLIVER, 2012). O álcool é uma parte importante do perfil sensorial da cerveja, proporcionando calor e um sabor característico que pode variar de acordo com o nível de fermentação e o tipo de levedura utilizado. O seu teor alcoólico pode variar dependendo da receita e do processo de produção, mas geralmente está na faixa de 8% a 12% de teor alcoólico, podendo chegar a valores ainda mais altos em algumas versões extremas (BJCP, 2015).

Tabela 13 – Análises físico-químicas das Cervejas Barleywine com diferentes tipos de mosturação.

| Cervejas                                | Mosturação Reduzida | Mosturação Padrão | Mosturação Elevada |
|-----------------------------------------|---------------------|-------------------|--------------------|
| °Brix (após fervura)                    | 25,6                | 28                | 30                 |
| Teor de Álcool (v/v %)                  | 11,60               | 11,89             | 8,61               |
| pH final                                | 4,99                | 4,42              | 4,53               |
| Acidez (v/m)                            | 1,89                | 2,39              | 2,10               |
| Cor (EBC)                               | 91,13               | 143,03            | 149,53             |
| Amargor (IBU)                           | 63                  | 56                | 65                 |
| Densidade Original (g/cm <sup>3</sup> ) | 1,079               | 1,078             | 1,084              |
| Densidade Final (g/cm <sup>3</sup> )    | 1,027               | 1,040             | 1,070              |
| Compostos Fenólicos (mg GAE/ ml)*       | 1,44                | 1,60              | 1,71               |

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023. \*GAE: ácido gálico.

Nesta pesquisa a cerveja produzida apresentou teor alcoólico final na faixa de 8-12%, o que é comumente citada como uma referência para o teor alcoólico de cervejas do estilo Barleywine em várias fontes de informação sobre cerveja, incluindo livros, guias de estilos cervejeiros e sites especializados em cerveja. Por exemplo, o Beer Judge Certification Program (BJCP), uma organização que estabelece padrões para competições de cerveja, descreve o estilo em seu guia como uma cerveja forte e maltada, com um teor alcoólico que varia de 8% a 12% teor alcoólico. Outros guias de estilos cervejeiros, como o Oxford Companion to Beer e o World Beer Cup Style Guidelines, também mencionam a faixa de 8% a 12% de teor alcoólico como uma referência.

No entanto, é possível verificar que a quantidade de álcool pode variar de acordo com as escolhas do cervejeiro e o processo de produção.

O pH ideal de uma cerveja do estilo Barleywine pode variar dependendo de vários fatores, como a receita, a fermentação e o processo de produção. A diferença no pH final da

cerveja irá depender das condições de pH da água utilizadas, do tipo de malte, do lúpulo e levedura empregados, além das condições de temperatura e tempo de mosturação (OLADOKUN et al., 2017).

Neste trabalho o pH final das cervejas nos diferentes tempos de mosturação foi de 4,42 a 4,99. Em uma pesquisa realizada por Pimentel et al. (2022) o pH de cervejas artesanais do estilo India Pale Ale (IPA) variaram de 4,38 e 4,47. O autor Salamon (2022) produziu uma cerveja artesanal IPA com pH de 4,59.

De acordo com a Beer Judge Certification Program (BJCP), o pH da Barleywine geralmente deve estar entre 4,2 e 4,6. Isso é semelhante ao intervalo recomendado para outras cervejas, pois um pH mais baixo pode tornar a cerveja muito ácida e um mais alto pode permitir o crescimento de bactérias indesejáveis (BJCP, 2023).

Alguns estudos mostraram que o pH pode afetar a percepção sensorial da cerveja, com valores mais baixos geralmente resultando em um sabor mais nítido e mais ácido, enquanto valores mais altos podem produzir um sabor mais suave e maltado (GONÇALVES, 2021).

A acidez produzida neste estudo foi de 1,89 a 2,39. Em pesquisa, Jardim et al. (2018) obtiveram acidez em cervejas do estilo IPA de 1,97 e para Robust Porter de 2,19. Esses estilos são considerados cervejas mais encorpadas, escuras e intensas assim como a Barleywine.

A cor da cerveja pode variar amplamente entre as diferentes receitas e estilos dentro da categoria de Barleywine, podendo ir desde tons de cobre claros até vermelho profundo, marrom ou mesmo preto. Esse estilo geralmente apresenta uma cor mais escura e intensa devido ao uso de maltes especiais em sua receita, mais escuros e caramelizados, que conferem notas de caramelo, toffee e frutas secas ao sabor da cerveja. Algumas versões mais intensas e envelhecidas podem ter uma cor ainda mais escura e opaca (BJCP, 2023; DANIELS, 2000).

Em relação ao EBC (European Brewery Convention), uma escala utilizada para medir a cor da cerveja, não há um padrão estabelecido para a cor da Barleywine. O valor de EBC do estilo pode variar bastante dependendo da receita e dos ingredientes utilizados na fabricação da cerveja.

Portanto, é comum que elas tenham um valor de EBC mais elevado do que outras cervejas de estilos mais claros. Neste estudo a cor foi de 91,13 a 149,53 EBC. Segundo o BJCP, uma Barleywine pode ter um valor de EBC que varia entre 20 e 80 EBC, mas isso pode variar bastante dependendo da receita específica.

Em geral, esse estilo tende a ter um perfil de amargor mais equilibrado e moderado em relação ao teor alcoólico e ao sabor maltado intenso característico do estilo (OLIVER, 2012). O resultado de amargor obtido para a Barleywine em IBU (International Bitterness Units) foi de 56 a 65, sendo semelhante às cervejas do estilo IPA, que variam entre 50 a 70 IBU. Estes resultados foram relatados por Cheiran (2018).

Algumas fontes de referência sugerem que cervejas Barleywine podem ter um perfil de amargor mais intenso, mas ainda assim equilibrado com o sabor maltado, com uma faixa de IBU que varia de cerca de 50 a 100 IBU para essas cervejas. Por exemplo, o BJCP, define o estilo em seu guia como uma cerveja forte, rica, complexa e maltada, com um teor alcoólico elevado e um perfil de amargor moderado a alto. O guia sugere uma faixa de IBU de 50 a 120 para o estilo, mas enfatiza que o equilíbrio entre o sabor maltado e o amargor é essencial para o sucesso da cerveja (BJCP, 2015). Os autores Zainasheff; Palmer (2007) sugerem em seu livro uma receita com um IBU de 80 a 100.

No entanto, é importante lembrar que o equilíbrio entre o amargor e o sabor maltado da cerveja é uma escolha do cervejeiro e pode variar de acordo com a receita e com as preferências pessoais. Algumas cervejas do estilo podem ter um perfil de amargor mais intenso e outras podem ter um perfil mais suave e equilibrado, dependendo dos ingredientes e do processo de produção utilizados (OLIVER, 2012). Ainda, o perfil de sabor e aroma de uma Barleywine depende de vários outros fatores, como o teor alcoólico, o perfil de malte e a escolha dos lúpulos.

A densidade esperada de uma Barleywine pode variar de acordo com a receita e a cervejaria, mas geralmente está na faixa de 1,080 a 1,120 em unidades de densidade original (OG), o que pode corresponder a cerca de 22 a 30 °Plato. o que significa que o mosto é muito denso e tem uma grande quantidade de açúcares para fermentar. A densidade final (FG) geralmente fica na faixa de 1,018 a 1,030 (BJCP, 2015).

No presente estudo a densidade original das mosturações foram de 1,078 a 1,084. Estes valores indicam um mosto com uma grande quantidade de açúcares que precisarão ser fermentados para produzir a cerveja. Quanto mais açúcares estiverem presentes no mosto, maior será a OG e, conseqüentemente, maior será o teor alcoólico potencial da cerveja.

A densidade final obtida para os diferentes tempos de mosturação foram de 1,040 para a cerveja de mosturação padrão; de 1,027 para a mosturação reduzida e 1,070 para a alta

mosturação. Uma densidade final de 1,070 é relativamente elevada e indica uma grande quantidade de açúcares residuais que não foram fermentados pelas leveduras.

É importante lembrar que a densidade final esperada pode variar dependendo de vários fatores, como a fermentação, a temperatura, o tipo de levedura, o teor de álcool e o envelhecimento da cerveja. Algumas possíveis causas para uma FG alta incluem: Baixa atividade da levedura ou quantidade insuficiente de levedura; Temperatura de fermentação muito baixa, o que pode retardar o metabolismo das leveduras; Presença de inibidores da fermentação, como excesso de oxigênio ou álcool em excesso.

Em um estudo da avaliação de estilos de cervejas, a Barleywine apresentou teor alcoólico de 8,9%, com densidade original 1,084, amargor de 43 EBU, cor de 70 EBC e pH 4,20 (PARKER et al., 2020). No presente trabalho, a cerveja de mosturação padrão resultou nos seguintes parâmetros finais: teor alcoólico de 11,89%, densidade de 1,078, amargor de 56 IBU, cor de 143 EBC e pH final de 4,42. Foram obtidos maior teor alcoólico, maior conversão dos açúcares, cor mais escura e maior amargor na cerveja do mesmo estilo.

A cerveja contém grande quantidade de compostos fenólicos que são provenientes principalmente do malte (cerca de 70%) e do lúpulo (cerca de 30%), sendo assim uma boa fonte de polifenóis (QUIFER-RADA et al., 2015). O conteúdo fenólico contribui para a atividade antioxidante geral da bebida. Quanto mais rica em antioxidantes, maior é a qualidade da cerveja, pois, apresentaram maior estabilidade em propriedades sensoriais, termos de turbidez, formação de cor, qualidade da espuma e maior vida de prateleira (FRANCESCO et al., 2020). Os fenólicos derivados do lúpulo, como as humulinonas, também contribuem para o amargor da cerveja (ALGAZZALI; SHELLHAMMER, 2016; MAYE et al., 2016).

Nesta pesquisa as cervejas finais apresentaram altos resultados de compostos fenólicos quando comparado com outras pesquisas. A cerveja de mosturação reduzida resultou em 1,44 mg GAE/mL de compostos fenólicos totais. Para a mosturação padrão o teor obtido foi de 1,60 mg GAE/mL. Para a cerveja final com o procedimento de alta mosturação o teor foi de 1,71 mg GAE/mL.

Na pesquisa de Bonifácio (2018) foram obtidos os teores de compostos fenólicos dos mostos de cerveja artesanal com adição de polpa da fruta sapoti, que variaram de 115,91 a 146,41 mg/100mL (equivalente a 1460,41 mg/L). O maior resultado foi obtido para o mosto da cerveja sem a adição da fruta. Ao analisar o teor de fenólicos da cerveja final os resultados

variaram de 72,00 a 107,81 mg/100mL. Resultados inferiores aos obtidos no presente trabalho, de 144,00 a 170,00 mg/100mL.

Esses valores foram maiores que os reportados no estudo de Barbosa (2016), onde o teor de fenólicos do mosto cervejeiro com a adição de polpa de maracujá foi de 99,00 mg/100mL. Na fabricação de cerveja artesanal com a adição de frutas (atemoia e maracujá) Freire (2018) obteve cerca de 111,29 mg/100mL de compostos fenólicos totais (isto equivale a cerca de 1112,90 mg/L).

Os autores Piazzon, Forte e Nardini (2010), que avaliaram os compostos fenólicos totais em diferentes tipos de cerveja, obtiveram resultados na faixa de 875 mg GAE/L. Ainda, Nardini; Garaguso (2020) avaliaram uma cerveja ale com adição de cereja que resultou em 767 mg/L. Em outro trabalho, Nardini e Foddai (2020) avaliaram cervejas ale com adição de cacau que apresentou 1026 mg/L e de nozes, onde o resultado foi de 964 mg/L. Estes resultados são inferiores aos obtidos na presente pesquisa, que foram de 1440 a 1700 mg/L.

#### **4.2. Estudo reológico das cervejas**

A reologia é a ciência que estuda o fluxo e a deformação de materiais, incluindo líquidos como a cerveja. O estudo da reologia de uma cerveja pode ajudar a entender como ela se comporta em diferentes condições, como durante o processo de produção, armazenamento e consumo. A reologia de uma cerveja do estilo Barleywine pode variar dependendo de vários fatores, como a quantidade de malte utilizado, o teor de álcool, o processo de fermentação e a temperatura de armazenamento (MA et al., 2014; GASPAR; MAIA, 2016).

Na produção de cerveja, a reologia é importante para garantir que a cerveja tenha as características desejadas, como viscosidade, textura, aparência e estabilidade da espuma. Durante o armazenamento, a reologia da cerveja pode mudar devido a processos como sedimentação, clarificação e envelhecimento, o que pode afetar a aparência, o sabor e a textura da cerveja (KANSKA, 2015).

Testes preliminares com uma cerveja denominada de Cerveja 1 (mosturação referente à Figura 13) foram realizados a fim de se conhecer o processo completo da produção cervejeira e com o objetivo de verificar a diferença na reologia do mosto pré-fervura e pós-fervura. Assim como, conhecer e compreender as análises reológicas e aplicação dos modelos matemáticos.

Para isso, uma cerveja do estilo *American Barleywine* foi produzida e a adição do lúpulo ocorreu durante a fervura. Amostras foram analisadas antes da fervura (sem adição de lúpulo) e após a fervura com a adição do lúpulo.

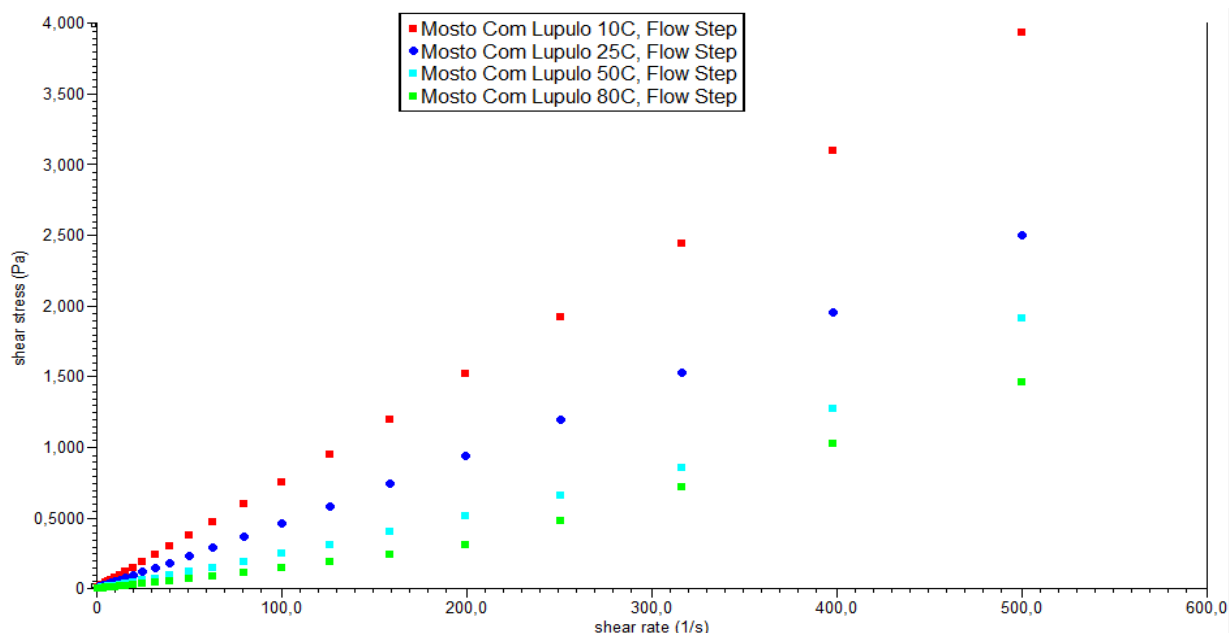
A característica essencial de uma *Barleywine* é a sua alta densidade, resultante de uma concentração elevada de malte, que contribui para um sabor forte e maltado, uma textura rica e um teor alcoólico elevado, geralmente acima de 8%.

#### 4.2.1. Reologia da Cerveja 1

A tensão de cisalhamento é a força necessária para fazer um líquido fluir quando está sujeito a uma tensão de cisalhamento. A relação entre a tensão de cisalhamento e a taxa de cisalhamento (a taxa na qual a tensão é aplicada) é conhecida como curva de fluxo ou curva de reologia (BIRD et al., 1987).

Os dados de tensão de cisalhamento foram obtidos após atingir o equilíbrio para cada taxa de cisalhamento. A tensão de cisalhamento do mosto com a adição de lúpulo (após fervura) variou de 0,077 Pa a 3,947 Pa na menor taxa de cisalhamento ( $1 \text{ s}^{-1}$ ) para a maior taxa de cisalhamento ( $500 \text{ s}^{-1}$ ), na temperatura de 10 °C. Em 25 °C variou de 0,051 a 2,478 nestas mesmas taxas de 1 a  $500 \text{ s}^{-1}$ ; Com a temperatura de 50 °C variou de 0,023 a 1,914 Pa, e com 80 °C foi de 0,015 a 1,432 Pa. Há uma proporção direta entre a taxa e a tensão de cisalhamento, com o aumento da taxa há o aumento da tensão de cisalhamento, comportamento apresentado na Figura 18.

Figura 18 – Comportamento reológico do mosto com a adição do lúpulo em função das diferentes temperaturas.

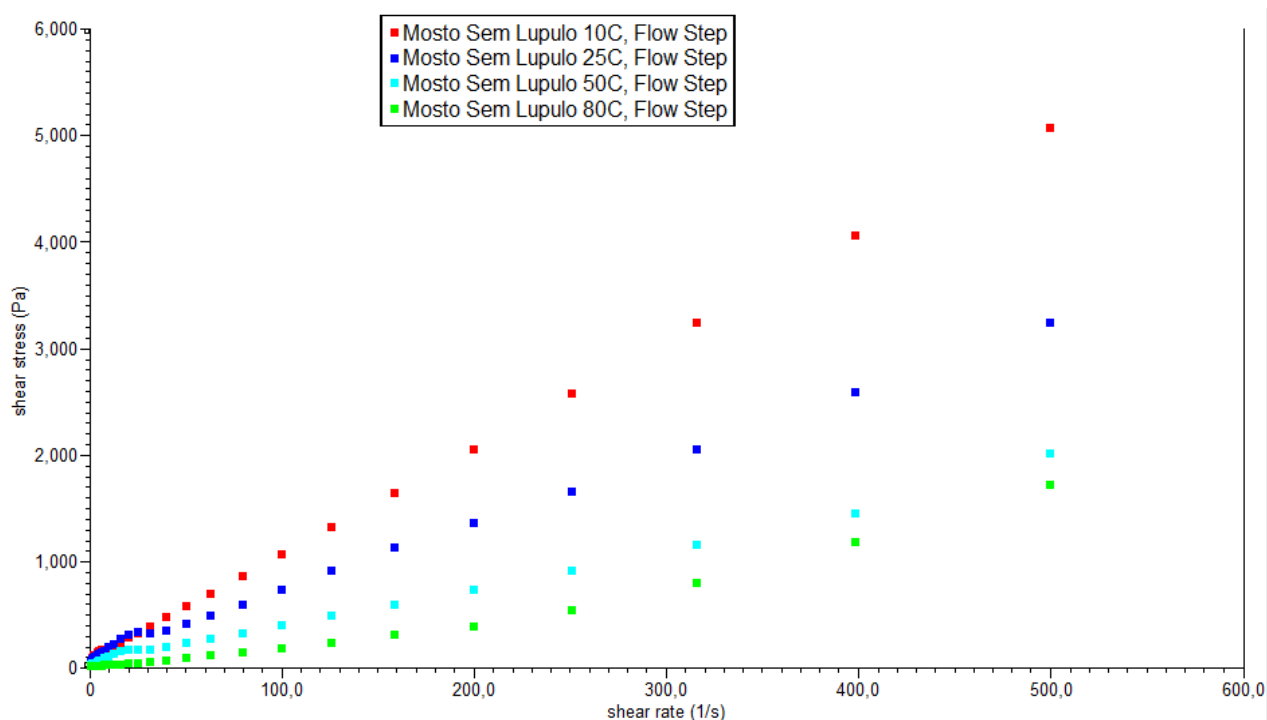


Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Com o aumento da temperatura, a cerveja com a adição de lúpulo apresentou diminuição na tensão de cisalhamento (Figura 18).

No mosto da cerveja sem a adição de lúpulo foi observado o mesmo comportamento. A tensão de cisalhamento do mosto sem a adição de lúpulo, ou seja, antes da fervura variou de 0,068 Pa a 5,072 Pa da menor taxa para a maior taxa de cisalhamento ( $1$  a  $500\text{ s}^{-1}$ ), na temperatura de  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Para a temperatura de  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  foi de 0,048 a 3,290 Pa na menor para a maior taxa. Em  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  variou de 0,031 a 2,017 Pa e em  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$  foi de 0,013 a 1,726 Pa. Para estes resultados também há uma proporção direta entre a taxa e a tensão, com o aumento da taxa há o aumento da tensão de cisalhamento, e com o aumento da temperatura a tensão diminui, comportamento apresentado na Figura 19. Estes resultados foram maiores do que com a adição de lúpulo (após a fervura), pois, sem a adição do lúpulo o mosto tem menor estabilidade. Isso também se deve a realização da fervura.

Figura 19 – Amostra de mosto pré-fervura, sem adição de lúpulo.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Em geral, o aumento da taxa de cisalhamento pode levar a um aumento da tensão de cisalhamento em líquidos com comportamento não newtoniano, ou seja, cuja viscosidade varia com a taxa de cisalhamento. Isso ocorre porque, ao aumentar a taxa de cisalhamento, as forças de cisalhamento que agem nas moléculas do líquido aumentam e, conseqüentemente, a tensão de cisalhamento necessária para o escoamento do líquido aumenta. No entanto, em alguns líquidos, como alguns fluidos de elevada viscosidade, a tensão de cisalhamento pode diminuir com o aumento da temperatura, como o observado para a cerveja antes e após a fervura. Isso ocorre porque a elevação da temperatura pode reduzir a viscosidade do líquido, tornando-o mais fácil de fluir e, portanto, reduzindo a tensão de cisalhamento necessária para o seu escoamento (HATZIKIRIAKOS, 2010; METZGER, 2013).

A tensão de cisalhamento está relacionada à viscosidade do líquido, que, no caso do mosto de cerveja, é afetada principalmente pelo teor de açúcares e proteínas presentes. O lúpulo, por outro lado, é utilizado principalmente para contribuir com o amargor, sabor e aroma da cerveja, assim como ajudar na conservação do produto devido às suas propriedades antibacterianas e estabilidade da espuma.

No entanto, é importante notar que durante a fervura do mosto, quando o lúpulo é adicionado, há uma coagulação de proteínas que pode afetar a viscosidade do mosto. Isto pode

estar relacionado à percepção de que o lúpulo reduz a tensão de cisalhamento, mas não é uma ação comumente atribuída a ele, pelo menos não de forma direta ou proposital.

Neste estudo, através da comparação entre os dois mostos, fica evidente que a adição de lúpulo ocasionou grande redução na tensão de cisalhamento do mosto cervejeiro. Confirmando que o lúpulo desempenha um papel importante na estabilização do mosto de cerveja e consequentemente promovendo a redução da tensão de cisalhamento.

A tensão de cisalhamento é uma medida da resistência de um líquido ao fluxo quando uma força é aplicada a ele. No caso do mosto de cerveja, essa força é exercida durante o processo de agitação, mistura e bombeamento durante a produção.

Existem várias razões pelas quais o lúpulo é capaz de reduzir a tensão de cisalhamento do mosto de cerveja, entre elas:

**Polifenóis:** O lúpulo contém polifenóis, compostos químicos que são liberados durante o processo de fervura. Esses polifenóis ajudam a estabilizar as proteínas no mosto, formando complexos de polifenol-proteína. Esses complexos têm propriedades de redução de tensão de cisalhamento, ajudando a diminuir a viscosidade do mosto.

**Iso-alfa-ácidos:** Durante o processo de fervura, os componentes do lúpulo chamados de alfa-ácidos sofrem isomerização e se convertem em iso-alfa-ácidos. Esses compostos têm a capacidade de inibir a agregação de proteínas no mosto, reduzindo a viscosidade e a tensão de cisalhamento.

**Agentes tensoativos:** O lúpulo também contém compostos conhecidos como agentes tensoativos, que ajudam a reduzir a tensão de cisalhamento. Esses agentes tensoativos diminuem a interação entre as moléculas de líquido, resultando em um mosto mais fluido.

No geral, o lúpulo desempenha um papel fundamental na produção de cerveja, não apenas adicionando aroma e sabor, mas também contribuindo para a estabilidade e redução da tensão de cisalhamento do mosto. Essas propriedades são importantes para garantir um processo de produção adequado e consistente, além de afetar os parâmetros de qualidade final da cerveja.

#### 4.2.1.1. Modelos Matemáticos

O efeito da temperatura no comportamento reológico de mosto foi estudado por meio de modelos matemáticos Newton; Ostwald De-Waele e Bingham nas temperaturas de 10, 25, 50 e 80 °C e concentração de 20 °P, sob uma taxa de deformação de 1 a 500 s<sup>-1</sup>.

Na modelagem, o modelo de Bingham apresentou ótimo ajuste estatístico nas temperaturas de 10 e 25 °C ( $R^2=0,999$ ), porém, quando a temperatura aumentou foram observados valores negativos de tensão de escoamento, sendo inconsistentes com os reportados para materiais com o mesmo comportamento reológico. A Tabela 14 apresenta os valores obtidos de tensão inicial de cisalhamento, seguidos da viscosidade Binghamiana.

Tabela 14 – Ajustes no modelo matemático de Bingham.

| T<br>°C | Com lúpulo          |                   |                   | Sem lúpulo          |                   |                   |
|---------|---------------------|-------------------|-------------------|---------------------|-------------------|-------------------|
|         | T med               | $\mu$ med         | $R^2_{adjMED}$    | T med               | $\mu$ med         | $R^2_{adj}$       |
| 10      | $-9.5459 \pm 3,67$  | $7.7934 \pm 0,02$ | $0.9997 \pm 0,00$ | $77.8735 \pm 4,55$  | $9.9152 \pm 0,06$ | $0.9999 \pm 0,00$ |
| 25      | $-12.7755 \pm 0,39$ | $4.8838 \pm 0,02$ | $0.9991 \pm 0,00$ | $113.2980 \pm 6,28$ | $6.2995 \pm 0,08$ | $0.9977 \pm 0,00$ |
| 50      | $-34.9970 \pm 0,03$ | $3.3261 \pm 0,00$ | $0.9683 \pm 0,00$ | $49.9167 \pm 4,09$  | $3.6730 \pm 0,01$ | $0.9936 \pm 0,00$ |
| 80      | $-40.3800 \pm 0,71$ | $2.5565 \pm 0,02$ | $0.9571 \pm 0,00$ | $-32.5980 \pm 4,57$ | $2.9681 \pm 0,00$ | $0.9560 \pm 0,00$ |

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Os modelos de Ostwald-de-Waele e Newton apresentaram melhor acurácia de ajuste aos dados experimentais com  $R^2 \geq 0,999$ . Entretanto, o modelo de Ostwald-de Waele foi o modelo que melhor descreveu o comportamento reológico da cerveja, por apresentar maior  $R^2$  (Tabela 15).

Tabela 15 – Ajustes no modelo matemático Ostwald-de-Waele.

| T<br>°C | Sem lúpulo        |                   |                   | Com lúpulo         |                   |                   |
|---------|-------------------|-------------------|-------------------|--------------------|-------------------|-------------------|
|         | k                 | $\eta$            | $R^2_{ajd}$       | k                  | $\eta$            | $R^2_{ajd}$       |
| 10      | $6.5173 \pm 0,22$ | $3.8550 \pm 0,00$ | $1.0000 \pm 0,00$ | $13.3776 \pm 0,53$ | $0.9533 \pm 0,00$ | $0.9981 \pm 0,00$ |
| 25      | $3.4471 \pm 0,01$ | $2.2595 \pm 0,00$ | $0.9999 \pm 0,00$ | $15.6281 \pm 1,75$ | $0.8546 \pm 0,01$ | $0.9933 \pm 0,00$ |
| 50      | $0.3542 \pm 0,00$ | $0.8634 \pm 0,00$ | $0.9919 \pm 0,00$ | $5.3830 \pm 0,56$  | $0.9429 \pm 0,01$ | $0.9872 \pm 0,00$ |
| 80      | $0.1098 \pm 0,00$ | $0.8116 \pm 0,01$ | $0.9974 \pm 0,00$ | $0.1697 \pm 0,04$  | $1.4828 \pm 0,04$ | $0.9934 \pm 0,00$ |

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023. \*Nível de consistência k (Pa.s); Índice de fluxo ( $\eta$ )

A partir dos valores obtidos para o índice de fluxo ( $\eta$ ) pode-se descrever o comportamento do fluido. Neste caso, foi observado que a cerveja mudou o seu comportamento com a mudança de temperatura. Ainda, o valor de  $R^2$  varia de 0 a 1, sendo que um valor de 1 indica que o modelo explica toda a variação dos dados. Em resumo, um modelo matemático com um valor maior de  $R^2$  é mais preciso em descrever os dados experimentais, ou seja, ele é capaz de explicar uma maior porcentagem da variação dos dados.

O fluido não apresentou valores de  $n = 1$ , portanto, não apresentou características newtonianas, e sim, para o mosto sem adição de lúpulo (antes da fervura) em 10 e 25 °C teve  $n > 1$ , atributo de fluido é dilatante. E para 50 e 80 °C  $n < 1$ , um comportamento pseudoplástico.

Antes da etapa de clarificação, a cerveja contém uma quantidade significativa de partículas que estão dispersas em um meio rico em compostos solúveis, como os açúcares, ácidos orgânicos, compostos fenólicos e sais. Esses compostos podem apresentar alto peso molecular, e quando submetidos a um aumento da taxa de cisalhamento, as cadeias moleculares se alinham em paralelo às linhas de corrente, reduzindo a resistência ao fluxo caracterizando um fluido com viscosidade aparente decrescente após o aumento da taxa de cisalhamento (HOLDSWORTH, 1971).

Os parâmetros de ajuste mostraram que o coeficiente de consistência diminuiu com o aumento da temperatura. O aumento da temperatura leva as moléculas a maior agitação, reduzindo a interação intermolecular e facilitando o escoamento do fluido. Por outro lado, o índice de comportamento do fluxo não apresentou tendência clara entre as temperaturas.

O coeficiente de consistência é uma medida de viscosidade que descreve a capacidade de uma substância fluir sob determinada condição de cisalhamento. Quando o coeficiente de consistência diminui com o aumento da temperatura, significa que a viscosidade da substância diminuiu com o aumento da temperatura.

Isso ocorre porque, em geral, o aumento da temperatura provoca uma diminuição da viscosidade dos líquidos, o que pode ser atribuído a uma diminuição das forças intermoleculares e a um aumento da mobilidade das moléculas. No caso específico de uma cerveja do estilo Barleywine, o coeficiente de consistência pode estar relacionado com a concentração de açúcares e outros sólidos dissolvidos, que podem afetar a viscosidade do líquido.

Tabela 16 – Ajustes no modelo matemático de Newton.

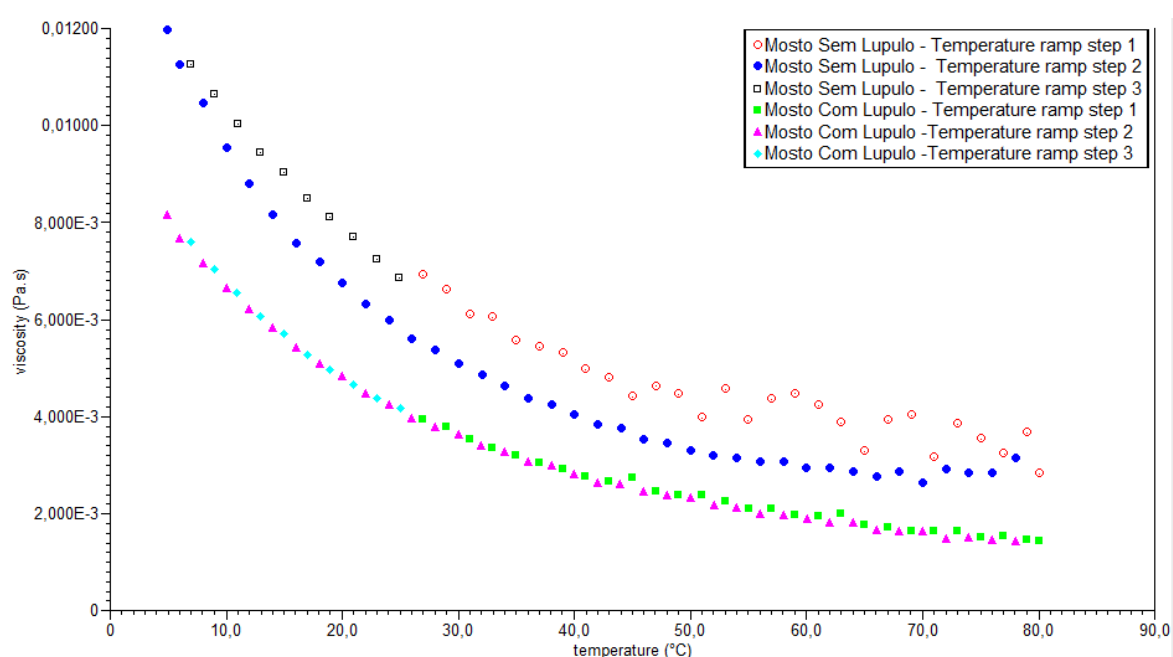
| T °C | Sem lúpulo     |                    | Com lúpulo    |                |
|------|----------------|--------------------|---------------|----------------|
|      | $\mu$ med      | R <sup>2</sup> adj | $\mu$ med     | R <sup>2</sup> |
| 10   | 10.1939 ± 0,07 | 0.9973 ± 0,00      | 7.7592 ± 0,00 | 0.9996 ± 0,00  |
| 25   | 6.7050 ± 0,11  | 0.9843 ± 0,00      | 4.8380 ± 0,02 | 0.9988 ± 0,00  |
| 50   | 3.8516 ± 0,02  | 0.9860 ± 0,00      | 3.2008 ± 0,00 | 0.9639 ± 0,00  |
| 80   | 2.8514 ± 0,02  | 0.9512 ± 0,00      | 2.4119 ± 0,02 | 0.9472 ± 0,00  |

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

A partir da Tabela 16 foi identificado que a viscosidade diminuiu com o aumento da temperatura nos dois processos. Os valores de  $R^2$  apresentam bom ajuste em 10 °C e 25 °C após a fervura.

A Figura 20 a seguir, apresenta a rampa de aquecimento de 5 a 80°C com taxa de deformação fixa em 100 ( $s^{-1}$ ) para cada amostra. É possível observar que a viscosidade diminuiu com o aumento da temperatura e que a amostra de mosto que passou pelo processo de fervura e adição de lúpulo se apresenta muito mais estável em comparação a outra amostra.

Figura 20 – Rampa de aquecimento com taxa de deformação fixa em 100 ( $s^{-1}$ ).



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Conforme a Tabela 17, a viscosidade diminuiu com o aumento da temperatura variando de 0,0078 a 0,0015 Pa.s, no mosto lupulado pós-fervura e mosto pré-fervura variou de 0,0685 a 0,013 Pa.s. Este comportamento está relacionado com a redução das forças hidrodinâmicas e atrito molecular, pois as moléculas são encontradas em maior grau de agitação.

O mosto pós-fervura, apresentou pouquíssima variação de viscosidade ao variar a taxa de deformação de 1 a 500  $s^{-1}$  com temperaturas baixas, enquanto o mosto pré-fervura, apresentou uma grande oscilação tanto em baixas quanto em altas temperaturas. Nota-se que para o mosto pré-fervura, ocorreu um efeito combinado entre o aumento da taxa de deformação com o aumento da temperatura, promovendo uma maior redução na viscosidade do fluido.

Tabela 17 – Comportamento da viscosidade expressa em Pa.s.

| $\gamma$ | Com lúpulo |        |        |        | Sem lúpulo |        |        |        |
|----------|------------|--------|--------|--------|------------|--------|--------|--------|
|          | 10 °C      | 25°C   | 50°C   | 80°C   | 10°C       | 25°C   | 50°C   | 80°C   |
| 1,00     | 0,0078     | 0,0051 | 0,0024 | 0,0015 | 0,0685     | 0,0481 | 0,0320 | 0,0138 |
| 1,26     | 0,0078     | 0,0055 | 0,0027 | 0,0016 | 0,0615     | 0,0505 | 0,0284 | 0,0115 |
| 1,59     | 0,0079     | 0,0052 | 0,0026 | 0,0016 | 0,0542     | 0,0457 | 0,0242 | 0,0104 |
| 2,00     | 0,0076     | 0,0045 | 0,0024 | 0,0016 | 0,0481     | 0,0397 | 0,0207 | 0,0094 |
| 2,51     | 0,0075     | 0,0047 | 0,0025 | 0,0016 | 0,0426     | 0,0352 | 0,0186 | 0,0079 |
| 3,16     | 0,0074     | 0,0047 | 0,0025 | 0,0016 | 0,0381     | 0,0308 | 0,0160 | 0,0066 |
| 3,98     | 0,0074     | 0,0046 | 0,0025 | 0,0016 | 0,0338     | 0,0273 | 0,0145 | 0,0051 |
| 5,01     | 0,0075     | 0,0046 | 0,0025 | 0,0015 | 0,0306     | 0,0247 | 0,0135 | 0,0041 |
| 6,31     | 0,0074     | 0,0046 | 0,0025 | 0,0014 | 0,0277     | 0,0222 | 0,0125 | 0,0034 |
| 7,94     | 0,0074     | 0,0046 | 0,0024 | 0,0014 | 0,0206     | 0,0203 | 0,0116 | 0,0030 |
| 10,00    | 0,0074     | 0,0046 | 0,0024 | 0,0014 | 0,0180     | 0,0185 | 0,0110 | 0,0027 |
| 12,59    | 0,0074     | 0,0045 | 0,0024 | 0,0013 | 0,0161     | 0,0173 | 0,0105 | 0,0025 |
| 15,85    | 0,0074     | 0,0044 | 0,0024 | 0,0014 | 0,0147     | 0,0164 | 0,0099 | 0,0023 |
| 19,95    | 0,0074     | 0,0044 | 0,0024 | 0,0014 | 0,0136     | 0,0157 | 0,0091 | 0,0022 |
| 25,12    | 0,0074     | 0,0044 | 0,0024 | 0,0014 | 0,0129     | 0,0150 | 0,0081 | 0,0021 |
| 31,62    | 0,0074     | 0,0044 | 0,0024 | 0,0014 | 0,0122     | 0,0137 | 0,0067 | 0,0021 |
| 39,81    | 0,0074     | 0,0044 | 0,0024 | 0,0014 | 0,0117     | 0,0107 | 0,0052 | 0,0021 |
| 50,12    | 0,0074     | 0,0044 | 0,0024 | 0,0014 | 0,0112     | 0,0088 | 0,0047 | 0,0022 |
| 63,10    | 0,0074     | 0,0044 | 0,0024 | 0,0014 | 0,0108     | 0,0081 | 0,0043 | 0,0021 |
| 79,43    | 0,0074     | 0,0045 | 0,0024 | 0,0014 | 0,0106     | 0,0077 | 0,0042 | 0,0021 |
| 100,00   | 0,0075     | 0,0045 | 0,0025 | 0,0015 | 0,0104     | 0,0075 | 0,0041 | 0,0021 |
| 125,90   | 0,0075     | 0,0045 | 0,0025 | 0,0015 | 0,0103     | 0,0075 | 0,0040 | 0,0021 |
| 158,50   | 0,0075     | 0,0046 | 0,0025 | 0,0015 | 0,0102     | 0,0074 | 0,0039 | 0,0021 |
| 199,50   | 0,0076     | 0,0046 | 0,0026 | 0,0016 | 0,0101     | 0,0071 | 0,0038 | 0,0021 |
| 251,20   | 0,0076     | 0,0047 | 0,0026 | 0,0019 | 0,0101     | 0,0067 | 0,0037 | 0,0022 |
| 316,20   | 0,0077     | 0,0048 | 0,0027 | 0,0022 | 0,0101     | 0,0066 | 0,0037 | 0,0025 |
| 398,10   | 0,0078     | 0,0049 | 0,0032 | 0,0026 | 0,0101     | 0,0066 | 0,0037 | 0,0030 |
| 500,00   | 0,0079     | 0,0050 | 0,0038 | 0,0029 | 0,0101     | 0,0066 | 0,0040 | 0,0035 |

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

O efeito da temperatura no coeficiente de consistência ( $k$ ) e na viscosidade ( $\mu$ ) é estudada pelo ajuste dos dados reológicos à equação de Arrhenius, que é uma equação empírica utilizada para descrever a relação entre a taxa de reação química e a temperatura. Essa equação pode ser adaptada para descrever a relação entre a viscosidade de um fluido e a temperatura, por meio da incorporação de um parâmetro de energia de ativação (BARNES, 1997).

O coeficiente de consistência é uma medida da resistência de um fluido ao fluxo, enquanto a viscosidade é a medida da resistência interna do fluido ao cisalhamento. Quando a temperatura aumenta, a energia cinética das moléculas do fluido aumenta, o que pode afetar a sua viscosidade. Especificamente, o aumento de temperatura pode reduzir a viscosidade de um fluido, pois isso diminui a resistência ao fluxo (SOUZA; CUNHA, 2019).

A equação de Arrhenius pode ser usada para descrever essa relação, estabelecendo que a viscosidade diminui exponencialmente com o aumento da temperatura. O coeficiente de consistência também pode ser afetado pela temperatura, com um aumento de temperatura resultando em uma redução na resistência ao fluxo, o que se reflete em uma diminuição do coeficiente de consistência (MUNIR et al., 2017).

Tabela 18 – Média e desvio padrão do modelo de Arrhenius para os mostos sem lúpulo (antes da fervura) e com lúpulo (após a fervura).

|       | Sem lúpulo |                                       |                | Com lúpulo |                                       |                |
|-------|------------|---------------------------------------|----------------|------------|---------------------------------------|----------------|
|       | A          | E <sub>a</sub> (J mol <sup>-1</sup> ) | R <sup>2</sup> | A          | E <sub>a</sub> (J mol <sup>-1</sup> ) | R <sup>2</sup> |
| Exp.1 | 0,0080     | -16764                                | 0,9900         | 0,0092     | -15764                                | 0,9689         |
| Exp.2 | 0,0066     | -17246                                | 0,9869         | 0,0096     | -15652                                | 0,9692         |
| Média | 0,0073     | -17005                                | 0,9885         | 0,0094     | -15708                                | 0,9690         |
| Dp    | 0,0010     | 340,82                                | 0,0021         | 0,0003     | 79,1959                               | 0,0002         |

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

$$\eta_{(Sem\ lúpulo)} = 7.30 \times 10^{-3} \exp\left(\frac{17005}{RT}\right), \quad R_{ajd}^2 = 0.968 \quad (1)$$

$$\eta_{(Com\ lúpulo)} = 9.40 \times 10^{-3} \exp\left(\frac{15708}{RT}\right), \quad R_{ajd}^2 = 0.969 \quad (2)$$

O modelo de Arrhenius foi ajustado aos dados de viscosidade, apresentando um ajuste satisfatório ( $R^2 \geq 0,96$ ).

#### 4.2.2. Comportamento reológico das cervejas produzidas em diferentes tempos de mosturações

O efeito da temperatura e da concentração no comportamento reológico do mosto com diferentes tempos de mosturação foi estudado por meio de modelos matemáticos Newton; Ostwald-de-Waele, Bingham e Herschel-Bulkley. A tensão de cisalhamento média foi calculada nas amostras para cada taxa de cisalhamento fixa na faixa de temperatura de 10 a 80 °C, sob uma taxa de deformação de 1 a 500 s<sup>-1</sup>.

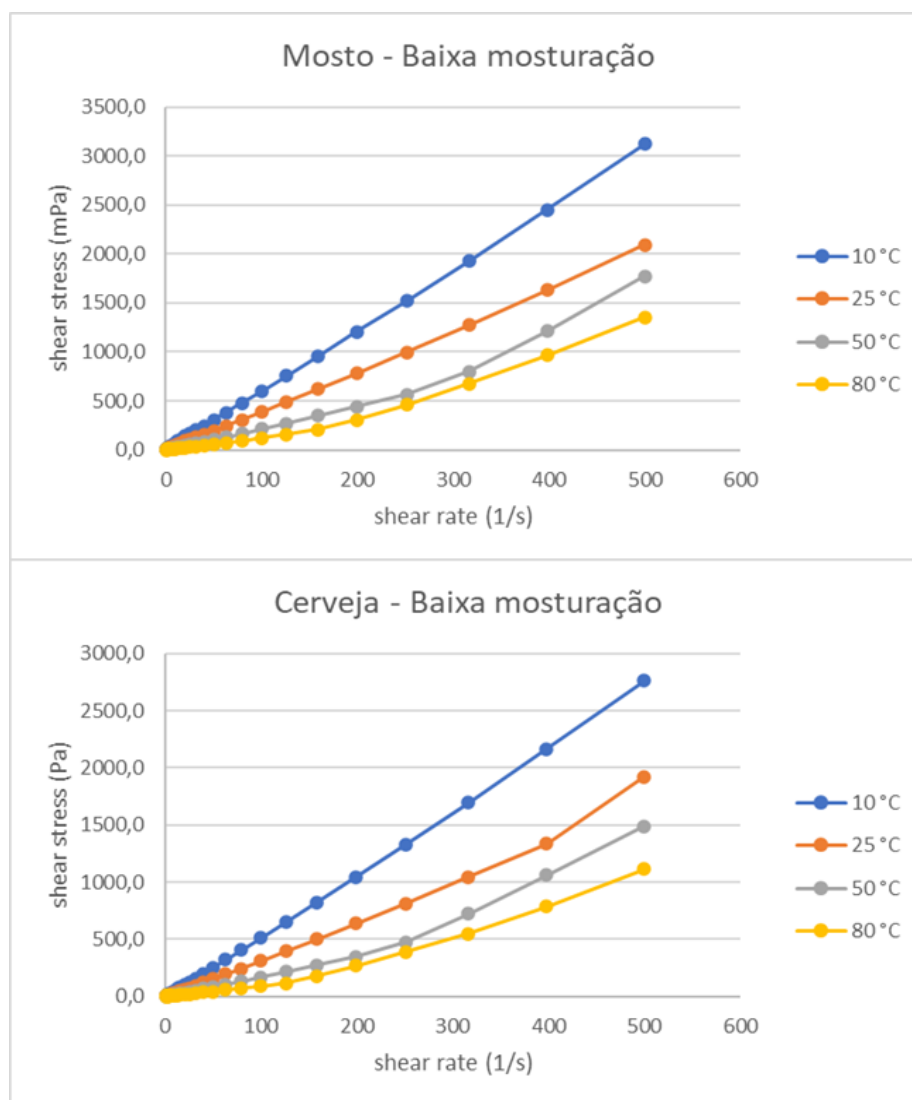
#### 4.2.2.1. Mosturação reduzida

Para o mosto com baixa mosturação (60 min. de mosturação e sacarificação) a tensão de cisalhamento variou de 1,311 a 7,361 mPa na menor taxa de cisalhamento ( $1 \text{ s}^{-1}$ ) e de 1356,50 mPa a 3124,50 mPa na maior taxa de cisalhamento ( $500 \text{ s}^{-1}$ ).

Para a cerveja final de baixa mosturação a tensão de cisalhamento variou de 0,929 a 5,37 mPa em  $1 \text{ s}^{-1}$  e de 1130 a 2759,50 mPa na maior taxa de  $500 \text{ s}^{-1}$ .

É possível verificar que os resultados de tensão de cisalhamento foram maiores no mosto e, tanto para o mosto quanto para a cerveja, diminuíram com o aumento da temperatura, maiores valores foram obtidos em  $10^\circ\text{C}$  e os menores valores em  $80^\circ\text{C}$  (Figura 21).

Figura 21 – Reogramas do comportamento do mosto e da cerveja de baixa mosturação tipo Barleywine em função das diferentes temperaturas testadas ( $10^\circ\text{C}$ ,  $25^\circ\text{C}$ ,  $50^\circ\text{C}$  e  $80^\circ\text{C}$ ).



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

A Figura 21 apresenta os reogramas de tensão de cisalhamento experimental e taxas de cisalhamento do mosto e da cerveja final. Onde é possível verificar que a temperatura desempenha um papel importante nos resultados dos dados experimentais, uma vez que, a tensão de cisalhamento aumentou à medida que a temperatura aumenta na faixa de taxa de cisalhamento estudada. A relação entre a taxa de cisalhamento e a tensão de cisalhamento mostrou um comportamento newtoniano avaliado com um padrão linear entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação, obedecendo a Lei de Newton (DE CASTILHOS et al., 2018).

A qualidade do ajuste dos modelos foi avaliada pelo coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e pelos erros relativos (%).

O modelo de Bingham apresentou boa acurácia estatística ( $R^2=0,999$ ) nas temperaturas mais baixas, tanto para o mosto quanto para a cerveja final, porém, quando a temperatura e o tempo de mosturação aumentaram foram observados valores negativos de tensão de escoamento, sendo inconsistentes com os reportados para materiais com o mesmo comportamento reológico. O ajuste de Bingham resultou em valores de tensão negativos, sem sentido do ponto de vista físico devido aos seus valores desprezíveis (GRATÃO; SILVEIRA; TELIS-ROMERO, 2007).

O modelo Newtoniano apresentou boa acurácia ( $R^2 = 0,999$ ) nas temperaturas mais baixas (10 e 25 °C), como apresentado na Tabela 2.

Tabela 19 – Ajustes no modelo matemático de Newton para a cerveja de baixa mosturação.

| T °C | Mosto           |                  | Cerveja          |                  |
|------|-----------------|------------------|------------------|------------------|
|      | $\mu$ med       | $R^2_{adj}$      | $\mu$ med        | $R^2$            |
| 10   | $6,15 \pm 0,02$ | $0,999 \pm 0,03$ | $5,40 \pm 0,10$  | $0,999 \pm 0,08$ |
| 25   | $4,07 \pm 0,01$ | $0,998 \pm 0,01$ | $3,48 \pm 0,06$  | $0,990 \pm 0,10$ |
| 50   | $2,94 \pm 0,04$ | $0,955 \pm 0,05$ | $2,50 \pm 0,07$  | $0,953 \pm 0,04$ |
| 80   | $2,26 \pm 0,08$ | $0,944 \pm 0,08$ | $1,854 \pm 0,06$ | $0,944 \pm 0,07$ |

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023. \*viscosidade média  $\mu$  (Pa.s).

Tanto para o modelo de Bingham quanto o Newtoniano a viscosidade diminuiu com o aumento da temperatura.

A Tabela 20 apresenta os resultados médios obtidos a partir do modelo de Ostwald-de-Waele para o mosto e a cerveja de baixa mosturação.

Tabela 20 – Ajustes no modelo matemático Ostwald-de-Waele para a cerveja de baixa mosturação.

| T °C | Mosto           |                 |                  | Cerveja         |                 |                  |
|------|-----------------|-----------------|------------------|-----------------|-----------------|------------------|
|      | k               | $\eta$          | $R_{ajd}^2$      | k               | $\eta$          | $R_{ajd}^2$      |
| 10   | $5,50 \pm 0,09$ | $1,01 \pm 0,03$ | $0,999 \pm 0,01$ | $4,11 \pm 0,12$ | $1,04 \pm 0,01$ | $0,999 \pm 0,01$ |
| 25   | $3,13 \pm 0,02$ | $1,04 \pm 0,07$ | $0,999 \pm 0,02$ | $1,45 \pm 0,02$ | $1,15 \pm 0,05$ | $0,996 \pm 0,03$ |
| 50   | $0,21 \pm 0,10$ | $1,44 \pm 0,11$ | $0,993 \pm 0,05$ | $0,15 \pm 0,06$ | $1,47 \pm 0,02$ | $0,995 \pm 0,02$ |
| 80   | $0,09 \pm 0,08$ | $1,54 \pm 0,09$ | $0,998 \pm 0,03$ | $0,07 \pm 0,03$ | $1,54 \pm 0,08$ | $0,999 \pm 0,00$ |

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023. \*Nível de consistência k (Pa.s); Índice de fluxo ( $\eta$ ).

O modelo de Ostwald-de-Waele apresentou boa acurácia com  $R^2 = 0,999$  nas temperaturas avaliadas. O índice de fluxo do mosto foi de  $n = 1$  nas menores temperaturas, indicando comportamento newtoniano. Após, em 50 e 80 °C apresentou  $n > 1$ , onde, o atributo de fluido é dilatante. Para a cerveja final esse comportamento ( $n > 1$ ) foi observado nas temperaturas de 25 °C a 80 °C. Portanto, foi observado que a cerveja mudou o seu comportamento com a mudança de temperatura (Tabela 20). O índice de fluxo  $n > 1$  indica que a viscosidade aumenta ao elevar a taxa de cisalhamento, esse perfil é observado em soluções de açúcar e soluções de amido.

Ainda, o nível de consistência diminuiu com o aumento da temperatura, indicando que, com o aumento da temperatura, a viscosidade da cerveja diminui. Pois, quando o coeficiente de consistência diminui com o aumento da temperatura, significa que a viscosidade da substância diminuiu com o aumento da temperatura (SOUZA; CUNHA, 2019).

O melhor ajuste para o mosto e a cerveja foi observado a partir do modelo de Herschel-Bulkley, com o resultado de todos os  $R^2 = 0,999$ , onde, foi também observado o comportamento newtoniano no mosto nas menores temperaturas, pois, o índice de fluxo do mosto foi de  $n = 1$  (Tabela 21).

Tabela 21 – Ajustes no modelo matemático Herschel-Bulkley para a cerveja de baixa mosturação.

| T °C | Mosto    |        |        |             | Cerveja  |        |         |             |
|------|----------|--------|--------|-------------|----------|--------|---------|-------------|
|      | $\tau_0$ | k      | $\eta$ | $R_{ajd}^2$ | $\tau_0$ | k      | $\eta$  | $R_{ajd}^2$ |
| 10   | 14,13 ±  | 4,94 ± | 1,03 ± | 0,999 ±     | 5,88 ±   | 3,90 ± | 1,054 ± | 0,999 ±     |
|      | 0,09     | 0,13   | 0,06   | 0,01        | 0,11     | 0,07   | 0,10    | 0,05        |
| 25   | 11,72 ±  | 2,73 ± | 1,06 ± | 0,999 ±     | 13,87 ±  | 1,17 ± | 1,18 ±  | 0,996 ±     |
|      | 0,02     | 0,08   | 0,11   | 0,00        | 0,01     | 0,11   | 0,02    | 0,02        |
| 50   | 26,17 ±  | 0,11 ± | 1,53 ± | 0,995 ±     | 16,87 ±  | 0,10 ± | 1,53 ±  | 0,997 ±     |
|      | 0,10     | 0,12   | 0,05   | 0,02        | 0,09     | 0,02   | 0,05    | 0,00        |
| 80   | 8,44 ±   | 0,07 ± | 1,58 ± | 0,999 ±     | 4,95 ±   | 0,06 ± | 1,57 ±  | 0,999 ±     |
|      | 0,04     | 0,02   | 0,08   | 0,03        | 0,01     | 0,10   | 0,06    | 0,04        |

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023. \*Tensão de escoamento  $\tau_0$  (Pa); Nível de consistência k (Pa.s); Índice de fluxo  $\eta$ .

No modelo de Herschel-Bulkley o nível de consistência que indica o grau de resistência ao escoamento também diminui com o aumento da temperatura. Indicando que a viscosidade do fluido diminui com o aumento da temperatura.

A tensão de escoamento ( $\tau_0$ ) é um parâmetro reológico que representa a tensão mínima necessária para que o fluido inicie o escoamento e está relacionada com as forças de interação entre as partículas dispersas no meio. Os resultados obtidos para  $\tau_0$  indicam que é necessária uma tensão inicial para o fluido escoar. Para a cerveja essa tensão deve aumentar com o aumento da temperatura, porém, em temperatura mais elevada como 80 °C a tensão necessária diminui, tanto para o mosto quanto para a cerveja.

A partir dos modelos avaliados foi certificado o comportamento de um fluido newtoniano em menores temperaturas, de 10 a 25 °C, e comportamento dilatante em maiores temperaturas, acima de 25 °C até 80 °C.

#### 4.2.2.2. Mosturação padrão

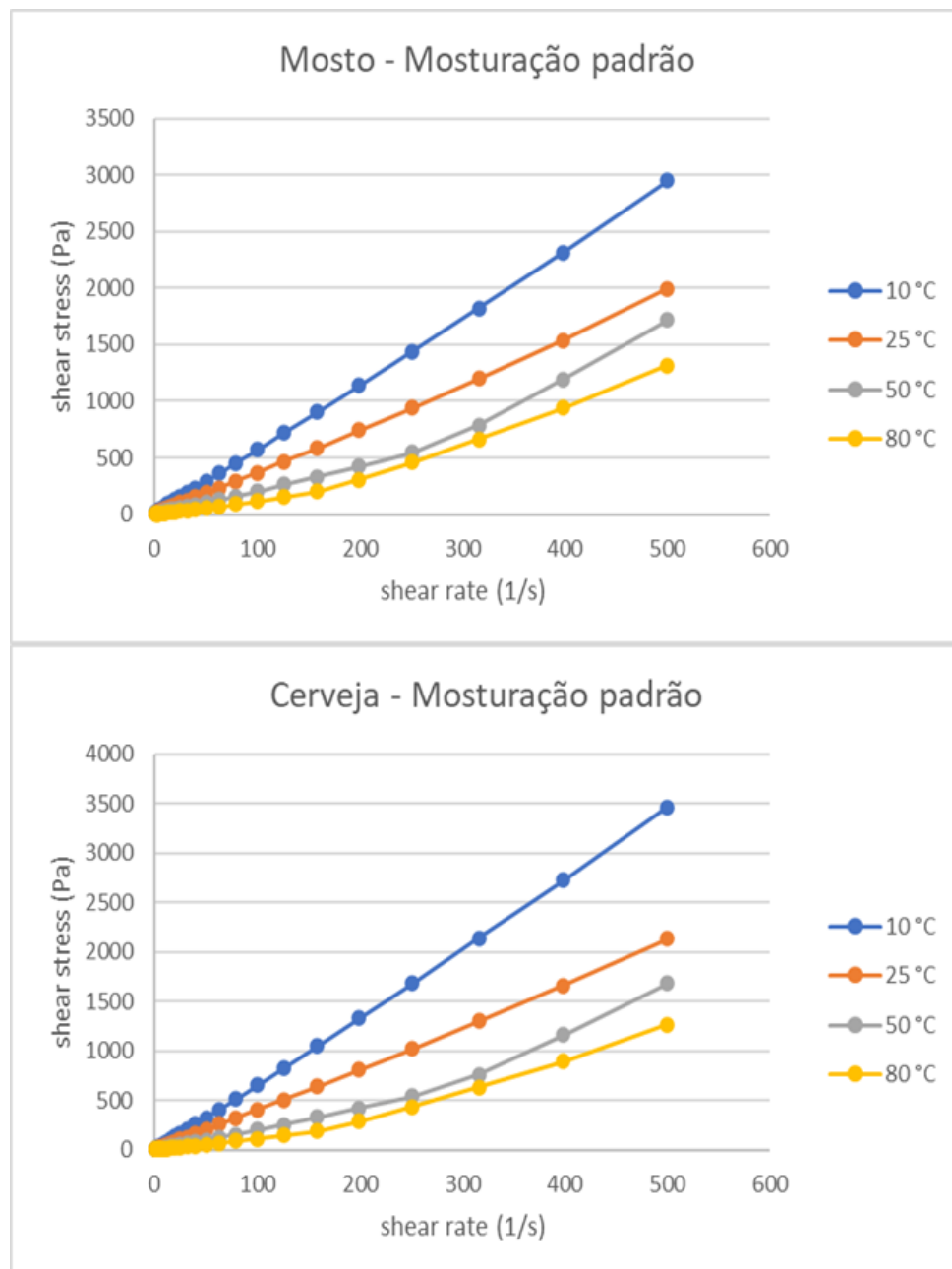
No mosto com a mosturação padrão (60 min. de mosturação à 60 °C e 30 min. de sacarificação à 70 °C) a tensão de cisalhamento variou de 5,187 a 10,731 mPa na menor taxa de cisalhamento ( $1 \text{ s}^{-1}$ ) e de 1319,50 mPa a 2952 mPa na maior taxa de cisalhamento ( $500 \text{ s}^{-1}$ ).

Para a cerveja final de mosturação padrão a tensão de cisalhamento variou de 4,941 a 6,249 mPa em  $1 \text{ s}^{-1}$  e de 1265 a 3463 mPa na maior taxa de  $500 \text{ s}^{-1}$ .

É possível verificar que os resultados de tensão de cisalhamento foram maiores para o mosto nas menores taxas de cisalhamento (5,18 a 10,73) do que para a cerveja final (4,94 a

6,24), onde a tensão foi mais elevada para as maiores taxas (1265 a 3463). No entanto, também é possível verificar que os resultados de tensão diminuíram com o aumento da temperatura (Figura 22).

Figura 22 – Reogramas do comportamento do mosto e da cerveja de mosturação padrão tipo Barleywine em função das diferentes temperaturas testadas (10, 25, 50 e 80 °C).



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

A partir da Figura 22 é verificado que há uma proporção direta entre a taxa e a tensão de cisalhamento, com o aumento da taxa há o aumento da tensão de cisalhamento, indicando um comportamento de fluido newtoniano. Ainda, o modelo matemático de Newton resultou em  $R^2 = 0,999$  para as menores temperaturas avaliadas e foi verificado que a viscosidade diminuiu com o aumento da temperatura (Tabela 22).

A tensão de cisalhamento de um fluido é determinada por vários fatores, não apenas sua densidade. De fato, a viscosidade do fluido, que está relacionada à sua resistência ao fluxo, é um fator importante. A viscosidade de um fluido pode ser afetada por vários fatores, incluindo temperatura, concentração de sólidos dissolvidos, e, no caso da cerveja, a concentração de álcool. Na fabricação da cerveja, observou-se que a tensão de cisalhamento do mosto era maior nas menores taxas de cisalhamento, possivelmente devido à sua complexa estrutura de grãos e açúcares solúveis. Por outro lado, a cerveja final apresentou maior tensão de cisalhamento nas taxas mais altas.

Embora seja conhecido que o álcool tem menor densidade do que a água, a presença de álcool pode realmente aumentar a viscosidade de uma solução aquosa. Isso ocorre porque as moléculas de álcool formam ligações de hidrogênio com as moléculas de água, o que aumenta a resistência ao fluxo. Portanto, a presença de álcool na cerveja pode, paradoxalmente, aumentar a tensão de cisalhamento em taxas de cisalhamento mais altas.

No entanto, a relação entre a taxa de cisalhamento e a tensão de cisalhamento não é sempre linear, especialmente em fluidos não-newtonianos como a cerveja. Em baixas taxas de cisalhamento, a tensão de cisalhamento pode ser alta devido à formação de estruturas em rede no fluido causadas, por exemplo, por proteínas ou polissacarídeos, ambos presentes em abundância no mosto cervejeiro. À medida que a taxa de cisalhamento aumenta, essas estruturas podem se romper, fazendo com que a tensão de cisalhamento diminua. Em taxas de cisalhamento ainda mais altas, no entanto, o comportamento do fluido pode mudar novamente.

Finalmente, vale a pena mencionar que as medições de tensão de cisalhamento são bastante sensíveis às condições experimentais. Pequenas variações na temperatura, pressão ou equipamento podem levar a resultados diferentes. Portanto, é sempre importante assegurar que as condições experimentais sejam tão consistentes quanto possível quando se fazem essas medições. Essas observações enfatizam a importância da compreensão das propriedades reológicas no processo de fabricação de cerveja, uma vez que afetam a eficiência da mosturação, a transferência de calor e a qualidade final do produto.

Tabela 22 – Ajustes no modelo matemático de Newton.

| T °C | Mosto           |                  | Cerveja         |                  |
|------|-----------------|------------------|-----------------|------------------|
|      | $\mu$ med       | $R^2_{adj}$      | $\mu$ med       | $R^2_{adj}$      |
| 10   | $5,82 \pm 0,11$ | $0,999 \pm 0,02$ | $6,80 \pm 0,09$ | $0,999 \pm 0,00$ |
| 25   | $3,86 \pm 0,09$ | $0,998 \pm 0,01$ | $4,16 \pm 0,10$ | $0,999 \pm 0,01$ |
| 50   | $2,86 \pm 0,10$ | $0,956 \pm 0,03$ | $2,79 \pm 0,04$ | $0,954 \pm 0,05$ |
| 80   | $2,21 \pm 0,03$ | $0,945 \pm 0,05$ | $2,10 \pm 0,08$ | $0,944 \pm 0,04$ |

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023. \*viscosidade média  $\mu$  (Pa.s).

O modelo de Ostwald-de-Waele apresentou acuracidade ao resultar em  $R^2 = 0,999$ . Ao avaliar o índice de fluxo ( $n$ ) que indica o grau de afastamento do fluido do modelo newtoniano, foi verificado que nas temperaturas de 10 e 25 °C o comportamento é newtoniano, acima destas temperaturas o fluido deixa de ser newtoniano, passando a ser dilatante ( $n > 1$ ). Ainda, foi observado que com aumento da temperatura o coeficiente de consistência diminuiu. Isso indica que a viscosidade do fluido diminui com o aumento da temperatura (Tabela 23).

Tabela 23 – Ajustes no modelo matemático Ostwald-de-Waele para a cerveja de mosturação padrão.

| T °C | Mosto           |                 |                  | Cerveja         |                 |                  |
|------|-----------------|-----------------|------------------|-----------------|-----------------|------------------|
|      | k               | $\eta$          | $R^2_{adj}$      | k               | $\eta$          | $R^2_{adj}$      |
| 10   | $5,34 \pm 0,08$ | $1,01 \pm 0,02$ | $0,999 \pm 0,00$ | $5,51 \pm 0,01$ | $1,03 \pm 0,07$ | $0,999 \pm 0,06$ |
| 25   | $2,98 \pm 0,06$ | $1,04 \pm 0,11$ | $0,999 \pm 0,02$ | $3,35 \pm 0,04$ | $1,03 \pm 0,12$ | $0,993 \pm 0,00$ |
| 50   | $0,20 \pm 0,12$ | $1,44 \pm 0,05$ | $0,994 \pm 0,04$ | $0,18 \pm 0,13$ | $1,46 \pm 0,06$ | $0,998 \pm 0,02$ |
| 80   | $0,09 \pm 0,01$ | $1,53 \pm 0,10$ | $0,998 \pm 0,07$ | $0,08 \pm 0,05$ | $1,54 \pm 0,08$ | $0,999 \pm 0,03$ |

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023. \*Nível de consistência k (Pa.s); Índice de fluxo  $\eta$ .

O melhor ajuste para o mosto foi observado com o modelo de Ostwald-de-Waele. Para a cerveja final de mosturação padrão foi observado no modelo de Herschel-Bulkley, com  $R^2 = 0,999$ .

Tabela 24 – Ajustes no modelo matemático Herschel-Bulkley para a cerveja de mosturação padrão.

| T °C | Mosto               |                    |                    |                     | Cerveja             |                    |                    |                     |
|------|---------------------|--------------------|--------------------|---------------------|---------------------|--------------------|--------------------|---------------------|
|      | $\tau_0$            | k                  | $\eta$             | $R_{ajd}^2$         | $\tau_0$            | k                  | $\eta$             | $R_{ajd}^2$         |
| 10   | 16,23<br>$\pm 0,02$ | 4,69 $\pm$<br>0,10 | 1,03 $\pm$<br>0,05 | 0,999 $\pm$<br>0,01 | 5,59 $\pm$<br>0,09  | 5,31 $\pm$<br>0,10 | 1,04 $\pm$<br>0,07 | 0,999 $\pm$<br>0,01 |
| 25   | 15,35<br>$\pm 0,01$ | 2,46 $\pm$<br>0,12 | 1,07 $\pm$<br>0,06 | 0,999 $\pm$<br>0,02 | 5,87 $\pm$<br>0,07  | 3,14 $\pm$<br>0,09 | 1,04 $\pm$<br>0,02 | 0,999 $\pm$<br>0,02 |
| 50   | 27,63<br>$\pm 0,03$ | 0,11 $\pm$<br>0,09 | 1,54 $\pm$<br>0,04 | 0,995 $\pm$<br>0,00 | 21,94<br>$\pm 0,05$ | 0,11 $\pm$<br>0,02 | 1,53 $\pm$<br>0,00 | 0,995 $\pm$<br>0,01 |
| 80   | 9,11 $\pm$<br>0,01  | 0,07 $\pm$<br>0,10 | 1,57 $\pm$<br>0,05 | 0,996 $\pm$<br>0,01 | 9,05 $\pm$<br>0,10  | 0,06 $\pm$<br>0,07 | 1,58 $\pm$<br>0,07 | 0,999 $\pm$<br>0,03 |

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023. \*Tensão de escoamento  $\tau_0$  (Pa); Nível de consistência k (Pa.s); Índice de fluxo  $\eta$ .

Os resultados obtidos para  $\tau_0$  indicam que é necessária uma tensão inicial para o fluido escoar (Tabela 24). Para a cerveja foi observado que essa tensão diminuiu com o aumento da temperatura, assim como o observado para a cerveja de mosturação reduzida com o uso deste mesmo modelo.

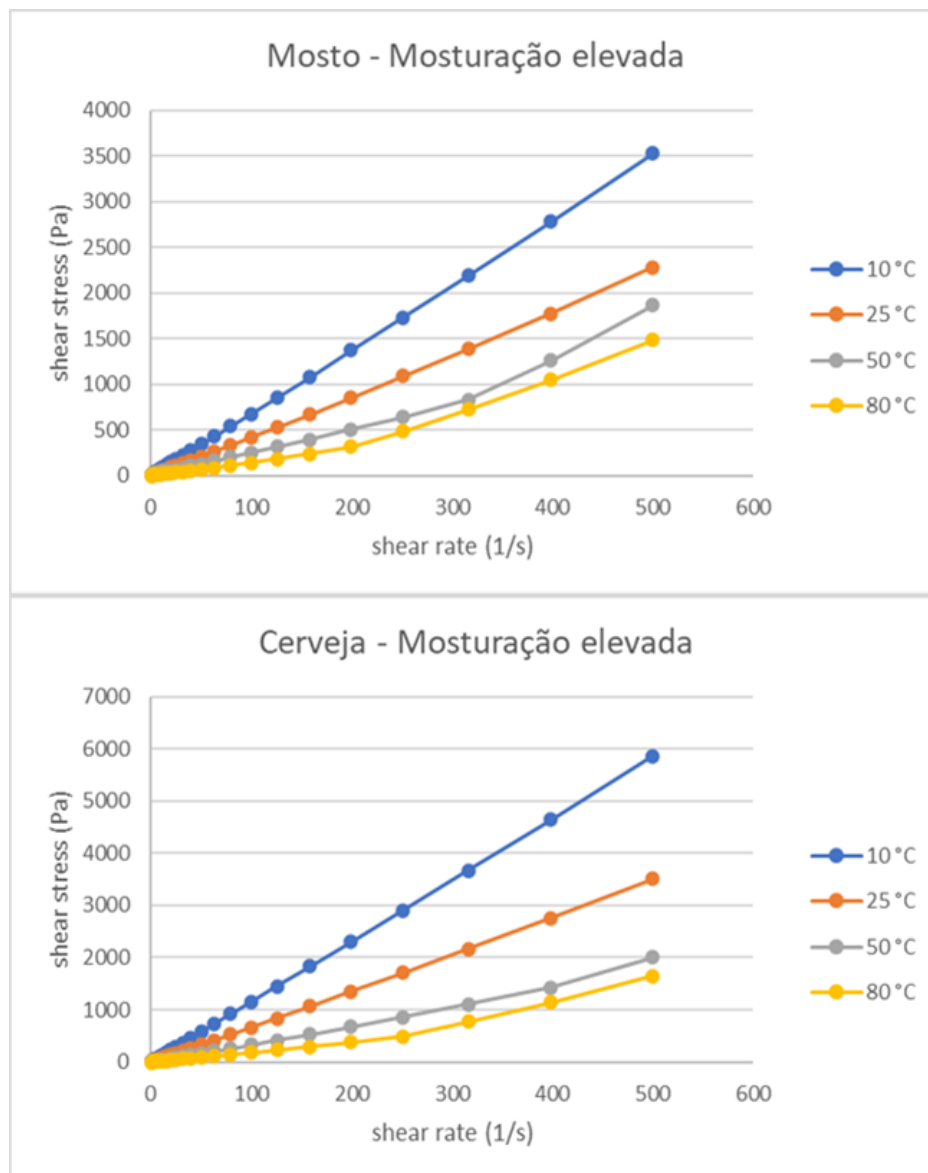
No modelo de Herschel-Bulkley o nível de consistência indica que o grau de resistência ao escoamento também diminui com o aumento da temperatura. Indicando que a viscosidade do fluido diminui com o aumento da temperatura.

#### 4.2.2.3. Mosturação elevada

Na produção de alta mosturação (30 min. de mosturação em 60 °C e 60 min. de sacarificação em 70 °C) a tensão de cisalhamento variou de 0,727 a 8,220 mPa na menor taxa de cisalhamento ( $1 \text{ s}^{-1}$ ) e de 1482 mPa a 3530 mPa na maior taxa de cisalhamento ( $500 \text{ s}^{-1}$ ). Para a cerveja final a tensão de cisalhamento variou de 1,957 a 12,010 mPa em  $1 \text{ s}^{-1}$  e de 1644 a 5861 mPa na maior taxa de  $500 \text{ s}^{-1}$ .

Os resultados de tensão de cisalhamento foram maiores na cerveja e, tanto para o mosto quanto para a cerveja, diminuíram com o aumento da temperatura, maiores valores foram obtidos em 10 °C e os menores valores em 80 °C, assim como o comportamento das outras mosturações (baixa e padrão).

Figura 23 – Reogramas do comportamento do mosto e da cerveja de alta mosturação tipo Barleywine em função das diferentes temperaturas testadas (10, 25, 50 e 80 °C).



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

A partir da Figura 23 é possível verificar o comportamento newtoniano do fluido, caracterizado pela dependência entre tensão e taxa de cisalhamento.

Tabela 25 – Ajustes no modelo matemático de Newton.

| T °C | Mosto           |                  | Cerveja          |                  |
|------|-----------------|------------------|------------------|------------------|
|      | $\mu$ med       | $R^2_{adj}$      | $\mu$ med        | $R^2$            |
| 10   | $6,97 \pm 0,08$ | $0,999 \pm 0,02$ | $11,64 \pm 0,09$ | $0,999 \pm 0,03$ |
| 25   | $4,43 \pm 0,01$ | $0,998 \pm 0,05$ | $6,90 \pm 0,01$  | $0,999 \pm 0,00$ |
| 50   | $3,13 \pm 0,03$ | $0,964 \pm 0,03$ | $3,68 \pm 0,04$  | $0,992 \pm 0,01$ |
| 80   | $2,45 \pm 0,11$ | $0,941 \pm 0,01$ | $2,71 \pm 0,10$  | $0,946 \pm 0,05$ |

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023. \*viscosidade média  $\mu$  (Pa.s).

Os resultados de viscosidade obtidos do modelo de Newton diminuíram tanto para o mosto quanto para a cerveja ao se elevar a temperatura.

Ao avaliar o ajuste do mosto e da cerveja final produzidos com mosturação elevada é observado um bom ajuste para as menores temperaturas ( $R^2 = 0,999$ ), assim como para as mosturações apresentadas anteriormente. Ao se elevar a temperatura é observado um comportamento de fluido dilatante ( $n > 1$ ). Esse comportamento está apontado na Figura 23, nas temperaturas mais elevadas (50 e 80 °C).

Tabela 26 – Ajustes no modelo matemático Ostwald-de-Waele para a cerveja de alta mosturação.

| T °C | Mosto           |                 |                  | Cerveja          |                 |                  |
|------|-----------------|-----------------|------------------|------------------|-----------------|------------------|
|      | k               | $\eta$          | $R^2_{ajd}$      | k                | $\eta$          | $R^2_{ajd}$      |
| 10   | $6,19 \pm 0,01$ | $1,02 \pm 0,03$ | $0,999 \pm 0,05$ | $11,07 \pm 0,11$ | $1,00 \pm 0,02$ | $0,999 \pm 0,02$ |
| 25   | $3,33 \pm 0,08$ | $1,04 \pm 0,01$ | $0,999 \pm 0,00$ | $5,75 \pm 0,07$  | $1,03 \pm 0,04$ | $0,999 \pm 0,00$ |
| 50   | $0,39 \pm 0,07$ | $1,35 \pm 0,10$ | $0,989 \pm 0,02$ | $1,70 \pm 0,01$  | $1,13 \pm 0,12$ | $0,997 \pm 0,02$ |
| 80   | $0,09 \pm 0,04$ | $1,56 \pm 0,06$ | $0,997 \pm 0,01$ | $0,12 \pm 0,03$  | $1,52 \pm 0,09$ | $0,995 \pm 0,06$ |

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023. \*Nível de consistência k (Pa.s); Índice de fluxo ( $\eta$ )

É possível verificar que o mosto e a cerveja apresentam comportamento newtoniano nas temperaturas baixas (10 a 25 °C) e comportamento dilatante nas temperaturas mais altas.

Ao utilizar o modelo de Herschel-Bulkley é observado um melhor ajuste para o mosto do que para a cerveja. É possível visualizar que a tensão necessária para o escoamento é menor em comparação aos tipos de mosturação anteriores, e ainda, para a cerveja final a tensão necessária aumentou com o aumento da temperatura, diferentemente das mosturações reduzida e padrão.

Tabela 27 – Ajustes no modelo matemático Herschel-Bulkley para a cerveja de alta mosturação.

| T °C | Mosto        |             |             |              | Cerveja      |              |             |              |
|------|--------------|-------------|-------------|--------------|--------------|--------------|-------------|--------------|
|      | $\tau_0$     | k           | $\eta$      | $R_{ajd}^2$  | $\tau_0$     | k            | $\eta$      | $R_{ajd}^2$  |
| 10   | 9,91 ± 0,00  | 5,80 ± 0,11 | 1,03 ± 0,04 | 0,999 ± 0,01 | 7,38 ± 0,07  | 10,76 ± 0,12 | 1,01 ± 0,08 | 0,999 ± 0,00 |
| 25   | 9,77 ± 0,03  | 3,00 ± 0,08 | 1,06 ± 0,02 | 0,999 ± 0,02 | 7,03 ± 0,03  | 5,49 ± 0,04  | 1,03 ± 0,10 | 0,996 ± 0,01 |
| 50   | 35,17 ± 0,06 | 0,19 ± 0,05 | 1,46 ± 0,10 | 0,993 ± 0,00 | 14,09 ± 0,10 | 1,41 ± 0,08  | 1,16 ± 0,04 | 0,997 ± 0,03 |
| 80   | 12,14 ± 0,02 | 0,06 ± 0,06 | 1,60 ± 0,07 | 0,998 ± 0,01 | 19,42 ± 0,02 | 0,07 ± 0,07  | 1,59 ± 0,02 | 0,996 ± 0,00 |

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023. \*Tensão de escoamento  $\tau_0$ ; Nível de consistência k (Pa.s); Índice de fluxo ( $\eta$ ).

Os modelos de Ostwald-de-Waele e de Herschel-Bulkley afirmaram o comportamento newtoniano do mosto e da cerveja nas menores temperaturas, e que, após o aumento, a partir de 50 °C o comportamento se torna dilatante, como o observado em soluções com alto teor de sólidos solúveis.

## 5. CONCLUSÕES

O desenvolvimento desta pesquisa consistiu na produção de 4 cervejas do estilo American Barleywine com diferentes tempos de mosturações (padrão, reduzida e mosturação elevada), onde, verificou-se o perfil físico-químico e reológico apresentado por esse fluído alimentício.

As características obtidas para as cervejas elaboradas foram a alta concentração de açúcares provenientes do mosto que resultaram em um alto teor alcoólico, presença elevada de compostos fenólicos, alta densidade e viscosidade, resultando em uma cerveja encorpada e escura com um amargor semelhante à de uma cerveja do estilo IPA.

Com o objetivo de verificar a diferença na reologia do mosto pré e pós-fervura análises foram realizadas com amostras obtidas antes da fervura (sem adição de lúpulo) e após a fervura (com a adição do lúpulo), onde, foi observado que a adição de lúpulo ocasionou grande redução na tensão de cisalhamento do mosto cervejeiro. Confirmando que o lúpulo desempenha um papel importante na estabilização do mosto de cerveja e consequentemente promovendo a redução da tensão de cisalhamento.

Na comparação das diferentes mosturações os resultados mostraram que o mosto e a cerveja final apresentam comportamento newtoniano quando em temperaturas abaixo de 25

°C. A partir disso o perfil dos fluidos mudou para não newtoniano, exibindo um comportamento dilatante. Ainda, foi observado que a tensão e a viscosidade diminuíram com o aumento da temperatura. Maiores tensões foram necessárias para menores temperaturas.

Para o mosto e cerveja produzidos com a mosturação reduzida e a elevada o modelo matemático que melhor se ajustou aos parâmetros foi o de Herschel-Bulkley. Com a mosturação padrão o modelo que apresentou os melhores ajustes para o mosto foi o de Ostwald-de-Waele e para a cerveja foi a partir do modelo de Herschel-Bulkley.

Paralelamente, evidenciou-se que a seleção apropriada da metodologia de mosturação exerce um impacto significativo na qualidade da cerveja resultante. Os experimentos demonstraram que as técnicas de mosturação padrão e reduzida geraram produtos que se alinharam estreitamente com as especificações estabelecidas para o estilo cervejeiro em questão. Em contrapartida, o uso de uma abordagem de mosturação elevada produziu uma cerveja que desviou consideravelmente dos parâmetros previamente definidos. Este achado sublinha a importância de escolher cuidadosamente os métodos de mosturação como uma variável crítica no processo de produção cervejeira.

## REFERÊNCIAS

- ALGAZZALI, V., SHELLHAMMER, T. Bitterness intensity of oxidized hop acids: humulinones and hulupones. *Journal of the American Society of Brewing Chemists*, v. 74, n. 1, p. 36-43, 2016. <http://dx.doi.org/10.1094/ASBCJ-2016-1130-01>
- ALMAGUER, C.; SCHONBERGER, C.; GASTL, M.; ARENDT E. K.; BECKER, T.; J. *Inst. Brew.* 2014, 120, 289
- ALVISI, F. *Manual de Treinamento Técnico Cervejeiro*. AmBev, 2011.
- AOAC - Association of Official Analytical Chemists. *Official Methods of analysis of AOAC International*. 18<sup>th</sup> Edition, 2005. Washington, DC. 2005.
- AQUARONE, E.; BORZANI, W.; SCHMIDELL, W.; LIMA, U. A. *Biotecnologia Industrial*. São Paulo: Edgard Blücher. 4 ed. p. 91 - 143. 2001.
- BAE, H.; JAYAPRAKASHA, G.K.; JIFON, J.; PATIL, B. S. Variation of antioxidant activity and the levels of bioactive compounds in lipophilic and hydrophilic extracts from hot pepper (*Capsicum* spp.) cultivars. *Food Chemistry*, v. 134, p. 1912–1918, 2012.
- BARBOSA, T. M. *Desenvolvimento de cerveja artesanal com polpa de maracujá amarelo (Passiflora edulis f. Flavicarpa deg) e avaliação da imobilização de células de Saccharomyces cerevisiae no processo de fermentação alcoólica*. 2016. 56 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Farmácia). Universidade de Brasília, 2016.
- BARNES, H. A. Thixotropy – A review. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, v. 70, n. 2, p. 1-33, 1997.
- BARNES, H. A.; HUTTON, J. F.; WALTERS, K. Viscometers for measuring shear viscosity. *An Introduction to Rheology, Rheology Series*, v. 3, p. 32-34, 1989.
- BARTH-HAS - Barth-hass Group. *THE BARTHHAAS REPORT: HOPS 2020*. Nuremberg: Pinsker Druck Und Medien Gmbh, 2022. 32 p. Disponível em: <https://www.barthhaas.com/en/news/barthhaas-report-2020>
- BAXTER, E. D.; HUGHES, P. S.; *Beer: quality, safety and nutritional aspects*, 1st ed., RSC Paperbacks: Cambridge, 2001.
- BIRD, R. B., ARMSTRONG, R. C.; HASSAGER, O. *Dynamics of polymeric liquids*, volume 1: Fluid mechanics. John Wiley & Sons. 1987.

BIRD, R. B.; STEWART, W. E.; LIGHTFOOT, E. N. Transport phenomena. New York: Wiley, 1960. 780p.

BJCP – Beer Judge Certification Program. BJCP Style Guidelines: Barleywine, 2015. disponível em: [https://bjcp.org/docs/2015\\_Guidelines\\_Beer.pdf](https://bjcp.org/docs/2015_Guidelines_Beer.pdf)

BJCP – Beer Judge Certification Program. English Barleywine, 2015. disponível em: <https://www.bjcp.org/style/2015/17/17D/english-barleywine/>

BJCP – Beer Judge Certification Program. Style Guidelines, 2021. Disponível em: [https://bjcp.org/docs/2021\\_Guidelines\\_Beer.pdf](https://bjcp.org/docs/2021_Guidelines_Beer.pdf)

BJCP – Beer Judge Certification Program. Style Guidelines, 2023. Disponível em: [https://bjcp.org/docs/2023\\_Guidelines\\_Beer.pdf](https://bjcp.org/docs/2023_Guidelines_Beer.pdf)

BONIFÁCIO, K. F. Produção de cerveja artesanal com polpa de sapoti (*Manilkara sapota* L.). 2018. 56 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Farmácia). Universidade de Brasília, 2018.

BRASIL. Decreto-lei nº 6.871, de 4 de Junho de 2009, que regulamenta a Lei nº 8.918, de 14 Julho de 1994. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_Ato2007-2010/2009/Decreto/D6871.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2009/Decreto/D6871.htm). Acesso em: 15 jul. 2022.

BRASIL. **Lei Instrução normativa nº 65, de 10 de dezembro de 2019.** Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/inspecao/produtos-vegetal/legislacao-1/biblioteca-de-normas-vinhos-e-bebidas/instrucao-normativa-no-65-de-10-de-dezembro-de-2019.pdf/view>. Acesso em: 24 jun. 2022.

CABRAL, R. A. F. Influência da temperatura e fração de água nos parâmetros reológicos do extrato de café. 2000. 103p. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência de Alimentos) – Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas, Universidade Estadual “Júlio de Mesquita Filho”. São Paulo, São José do Rio Preto, 2000.

CABRAL, R. A. F.; GUT, J. A. W.; TELIS, V. R. N.; TELIS-ROMERO, J. Non-newtonian flow and pressure drop of pineapple juice in plate heat exchanger. Brazilian Journal of Chemical Engineering, v. 27, n. 4, p. 563-571, 2010.

CARVALHO, L. G. Dossiê Técnico. Produção de cerveja. Rede de Tecnologia do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, mar. 2007.

CASTRO, A.G. de; COVAS, J.A.; DIOGO, A.C. Reologia e suas aplicações industriais. Coleção Ciência e Técnica, Instituto Piaget, Lisboa, 2001.

CERVBRASIL – Associação Brasileira da Indústria da Cerveja. A cerveja. 2021. Disponível em: [http://www.cervbrasil.org.br/novo\\_site/a-cerveja](http://www.cervbrasil.org.br/novo_site/a-cerveja)

CHINN, M. S.; SHARMA-SHIVAPPA, R. R.; COTTER, J. L. Solvent extraction and quantification of capsaicinoids from *Capsicum chinense*. Food and Bioproducts Processing, v. 89, p. 340-345, 2011.

DAHDOUH, L.; WISNIEWSKI, C.; RICCI, J.; VACHOUD, L.; DORNIER, M.; DELALONDE, M. Rheological study of orange juices for a better knowledge of their suspended solids interactions at low and high concentration. Journal of Food Engineering, v. 174, p. 15-20, 2016.

DANIELS, R. Designing Great Beers: The Ultimate Guide to Brewing Classic Beer Styles. Brewers Publications. Boulder, Colorado. 2000.

DE CASTILHOS, M. B. M.; BETIOL, L. F. L.; CARVALHO, G. R.; TELIS-ROMERO, J. Experimental study of physical and rheological properties of grape juice using different temperatures and concentrations. Part II: Merlot. Food Research International, v. 105, p. 905-912, 2018.

DEUS, E., OLIVEIRA, C. Inovação Cooperativa, Coworking e o Mercado de Cerveja Artesanal Fluminense. Gestão & Regionalidade, v. 37, n. 112, p. 119-139, 2021.

DITCHFIELD, C.; TADINI, C. C.; SINGH, R. K.; TOLEDO, R. Rheological properties of banana puree at high temperatures. International Journal of Food Properties, v. 7, n. 3, p. 571-584, 2004.

DRAGONE, G.; SILVA, J. B. A.; SILVA, T. A. O. Cerveja. In: VENTURINI FILHO, W. G. V. Bebidas Alcoólicas: ciência e tecnologia. São Paulo: Blucher, v. 1. 2010.

FAGHERAZZI, M. M. et al. A cultura do lúpulo: botânica e variedades. Revista Agronomia Brasileira, v. 1. 2017.

FLAUZINO, R. D. Influência da temperatura e do teor de gordura nos parâmetros reológicos do leite condensado e creme de leite. 2007. 99f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e

Ciência de Alimentos) – Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas, Universidade Estadual “Júlio de Mesquita Filho”. São Paulo, São José do Rio Preto, 2011.

FLORES, R. G.; WATANABE, S. H. Desenvolvimento de cerveja estilo witbier através do processo semi-industrial, controle de qualidade e análise sensorial. R.E.V.I - Revista de Estudos Vale do Iguaçu, v. 1, n. 23, p. 27–48, 2014.

FRANCESCO, G.; BRAVI, E.; SANARICA, E.; MARCONI, O.; CAPPELLETTI, F.; PERRETTI, G. Efeito da adição de diferentes extratos ricos em fenólicos na estabilidade do sabor da cerveja. Alimentos. v. 9, p. 1638, 2020. doi: <https://doi.org/10.3390/foods9111638>

FREIRE, B. R. Produção de cerveja artesanal com frutas exóticas e avaliação da imobilização de leveduras em micropartículas magneto poliméricas no processo de fermentação alcoólica. 2018. 91 p., Dissertação (Mestrado), Universidade de Brasília, 2018.

GASPAR, A.; MAIA, R. Rheology of beer. In Handbook of Brewing. CRC Press, p. 419-444, 2016.

GIORGI, Victor de Vargas. “Cultos em cerveja”: discursos sobre a cerveja artesanal no Brasil. Sociedade E Cultura, v. 18, n. 1. 2016. DOI: <https://doi.org/10.5216/sec.v18i1.40607>

GONÇALVES, L. M. Desenvolvimento de compósitos de polipropileno (PP) com bagaço de malte e argila organofílica. 2021. 72 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Materiais) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Nova Friburgo. 2021.

GRATÃO, A. C. A.; SILVEIRA JÚNIOR, V.; TELIS-ROMERO, J. Laminar flow of soursoop juice through concentric annuli: Friction factors and rheology. Journal of Food Engineering, v. 78, n. 4, p. 1343-1354, 2007.

GRIBKOVA, I. N.; KHARLAMOVA, L. N.; LAZAREVA, I. V.; ZAKHAROV, M. A.; ZAKHAROVA, V. A.; KOZLOV, V. I. The Influence of Hop Phenolic Compounds on Dry Hopping Beer Quality. Molecules 2022, 27, 740. <https://doi.org/10.3390/molecules27030740>

HATZIKIRIAKOS, S. G. Appropriate Boundary Conditions in the Flow of Molten Polymers. International Polymer Processing, v. 25, n. 1, p. 55-62, 2010. <https://doi.org/10.3139/217.2304>

HIERONYMUS, S. For the love of hops: the practical guide to aroma, bitterness and the culture of hops. Brewer’s publications, P. 321. 2012.

HOLDSWORTH, S. D. Applicability of rheological models to the interpretation of flow and processing behaviour of fluid food products. *J. Texture Studies*, v. 2, p. 393– 418, 1971.

IBANEZ, M. O que é cerveja artesanal? 2017. Disponível em: <http://www.ocaneco.com.br/o-que-e-cerveja-artesanal>. Acesso em: 17 ago. 2017.

JARDIM, C. C.; DE SOUZA, D.; MACHADO, C. K. I.; PINTO, M., N., L.; RAMOS, S. R. C.; GARAVAGLIA, J. Sensory Profile, Consumer Preference and Chemical Composition of Craft Beers from Brazil. *Beverages*, v. 4, n. 106, 2018.  
<https://doi.org/10.3390/beverages4040106>

JORGE, T. Caracterização da Farinha da Semente de Pinhão (*Araucária angustifolia*) e Aplicação como Adjunto na Produção de Cerveja. Tese de Doutorado em Ciências de Alimentos. 2018. 149 f. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Santa Catarina, 2018.

KANSKA, M. Rheology of beer—Recent advances. *Trends in Food Science & Technology*, v. 43, n. 1, p. 43-58, 2015.

KEUKELEIRE, D.; HEYERICK, A. Hop (*Humulus lupulus*) – derived bitter acids as multipotente bioactive compounds. *Journal of natural products*. v. 72, n. 6, 2009.

KISSMEYER, A. B., EBC. In: OLIVER, Garret, *The oxford Companion to Beer*. 1 ed. USA: Oxford University Press, 2011.

KRAFTCHICK, J. F.; BYRD, E. T.; CANZIANI, B.; GLADWELL, N. J. Understanding beer tourist motivation. ***Tourism Management Perspectives***. 12; 41–47. 2014.

KUCHARCZYK, K. TUSZYNSKI, T. The effect of wort aeration on fermentation, maturation and volatile components of beer produced on an industrial scale. *Institute of Brewing & Distilling*. v. 123, p. 31-38. 2017.

LEMOES, E. H. Automação de um processo de malteação. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia de Automação Industrial). 55f. 2017. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Araxá, MG. 2017.

MA, L.; YE, F.; XU, Y. Rheological properties and stability of beer. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, v. 18, n. 3, p. 704-721, 2019.

MARCUSSO, E. F. AS MICROERVEJARIAS NO BRASIL ATUAL: Sustentabilidade e Territorialidade. SOROCABA-SP: Programa de Pós-Graduação em Sustentabilidade na Gestão Ambiental - UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS 171 p. 2015.

MATOS, R. A. G. Cerveja: Panorama do mercado, produção artesanal e avaliação de aceitação e preferência. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Agrônoma. 2011. 90 f. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Santa Catarina, 2011.

MAYE, J. P., SMITH, R., LEKER, J. Humulinone formation in hops and hop pellets and its implications for dry hopped beers. MBAA TQ, v. 53, n. 1, p. 23-27, 2016.  
<http://dx.doi.org/10.1094/TQ-53-1-0227-01>

MEGA, J. F.; NEVES, E.; ANDRADE, C. J. A PRODUÇÃO DA CERVEJA NO BRASIL. Revista CITINO, [S.l.], 11 out. 2011. HESTIA, p. 34-42. Disponível em:  
<http://www.hestia.org.br/wp-content/uploads/2012/07/CITINOAno1V01N1Port04.pdf>

MENICHINI, F.; TUNDIS, R.; BONESI, M.; LOIZZO, M. R.; CONFORTI, F.; STATTI, G.; CINDIO, B.; HOUGHTON, P. J.; MENICHINI, F. The influence of fruit ripening on the phytochemical content and biological activity of *Capsicum chinense* Jacq. cv Habanero. Food Chemistry, v. 114, 553–560, 2009.

METZGER, B.; RAHLI, O.; YIN, X. Heat transfer across sheared suspensions: Role of the shear-induced diffusion. Journal of Fluid Mechanics, v. 724, p. 527-552, 2013.  
[doi:10.1017/jfm.2013.173](https://doi.org/10.1017/jfm.2013.173)

MORADO, R. Larousse da Cerveja, 1ª edição. São Paulo, SP: Larousse do Brasil, 2017. 357p.

MORTON, J. A arte de fazer cerveja: ingredientes, técnicas e receitas para produzir a bebida. São Paulo: Publifolha, 2017.

NARDINI, M.; FODDAI, M. S. Phenolics Profile and Antioxidant Activity of Special Beers. Molecules, v. 25, n. 11, p. 2466, 2020.

NARDINI, M.; GARAGUSO, I. Characterization of bioactive compounds and antioxidant activity of fruit beers. Food Chemistry, v. 305, 125437, 2020.

OETTERER, M.; ALCARDE, A. R. Tecnologia da fabricação de cerveja. In: OETTERER, M.; D'ARCE, M. A. B. R.; SPOLO, M. H. F. Fundamentos de Ciência E Tecnologia de Alimentos. Barueri (SP): Editora Manole Ltda, 2006. 612p.

OLADOKUN, O., JAMES, S., COWLEY, T., SMART, K., HORT, J., COOK, D. Dry-hopping: the effects of temperature and hop variety on the bittering profiles and properties of resultant beers. **Brewing Science**, v. 70, n. 6, p. 187-196. 2017.  
<http://dx.doi.org/10.23763/BrSc17-18oladokun>

OLIVER, G., The Oxford Companion to Beer. 1 ed. USA: Oxford University Press, 2011.

OLIVER, GARRETT. Te Oxford Companion to Beer. Oxford: Oxford University Press. ed. 2012.

PALMER, J. How to Brew: Everything You Need to Know to Brew Great Beer Every Time. Brewers Publications, 4 Edição, p. 582. 2017.

PARADA, A. Cerveja artesanal em São Paulo. 2017. Disponível em:  
<https://cervejaartesanalesaopaulo.com.br/tag/carbonatacao>

PARKER, D. et al. British beer styles. Where are they heading? British Food Journal, v. 22, n. 1, p. 60, 2020.

PHILLISKIRK, Geroge. Fermentation. In OLIVER, Garret, The oxford Companion to Beer. 1 ed. USA: Oxford University Press, 2011.

PIAZZON, A. FORTE, M. NARDINI, M. Characterization of Phenolics Content and Antioxidant Activity of Different Beer Types. Journal of Agricultural and Food Chemistry. 58, 10677 – 10683, 2010.

PIMENTEL, C., ÉDI M., SOUZA, P. G., PONTES, G. C., LIMA, J. S., MARINHO, H. A., SOUZA, E. S. Produção e avaliação da qualidade físico-química da cerveja american IPA adicionada de noni (*Morinda citrifolia*). Conjecturas, v. 22, n. 8, p. 1173–1180, 2022.  
<http://conjecturas.org/index.php/edicoes/article/view/1320>

PINO, J.; GONZALEZ, M.; CEBALLOS, L.; CENTURION-YAH, A. R.;  
TRUJILLOAGUIRRE, J.; LATOURNERIE-MORENO, L.; SAURI-DUCH, E.  
Characterization of total capsaicinoids, colour and volatile compounds of Habanero chilli

pepper (*Capsicum chinense* Jack.) cultivars grown in Yucatan. *Food Chemistry*, v. 104, p. 1682–1686, 2007.

QUIFER-RADA, P., VALLVERDÚ-QUERALT, A., MARTÍNEZ-HUÉLAMO, M., CHIVA-BLANCH, G., JÁUREGUI, O., ESTRUCH, R., & LAMUELA-RAVENTÓS, R. A comprehensive characterisation of beer polyphenols by high resolution mass spectrometry (LC–ESI-LTQ-Orbitrap-MS). *Food Chemistry*, v. 169, p. 336–343, 2015.

RETTBERG, N.; BIENDL, M.; GARBE, L.; J. Am. Soc. Brew. Chem. 2018, 76, 1 ROSA, N. A.; AFONSO, J. C. A química da cerveja . *Quím. Nova esc. São Paulo*. v. 37, n. 2, p. 98-105, 2015

ROSA, N. A.; AFONSO, J. C. A Química da Cerveja. **Química e Sociedade**. Academia, v, 37. n, 2. p. 98-115. 2015. doi: <http://dx.doi.org/10.5935/0104-8899.20150030>

SALAMON, R. V.; DABIJA, A.; FERENCZ, Á.; TANKÓ, G.; CIOCAN, M. E.; CODINĂ, G. G. The Effect of Dry Hopping Efficiency on  $\beta$ -Myrcene Dissolution into Beer. **Plants**, v. 11 , n. 8, p. 1043, 2022. <https://doi.org/10.3390/plants11081043>

SEMAE - Serviço Municipal de Águas e Esgotos. Resultado de Análises de Água por Sistema. 2022. Disponível em: <https://semae.riopreto.sp.gov.br/resultado-de-analises-de-agua-por-sistema.aspx>

SILVA, H. A.; LEITE, M. A.; PAULA, A. R. V. D. Cerveja e sociedade. *Contextos da Alimentação – Revista de Comportamento, Cultura e Sociedade*, v. 4, n. 2, p. 7, 2016.

SOARES, N. Tempo de mudança. **Engarrafador Moderno**, n. 205, p. 14–22, 2011.

SPINDLER, E. S. A inovação e cooperação nas micro cervejarias do Rio Grande do Sul: um estudo de caso múltiplo sob a ótica da perspectiva da lógica institucional. 2019. 133 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Administração, Área de Concentração Inovação, Tecnologia e Sustentabilidade, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/200112>

SPÓSITO, M.; ISMAEL, R.; BARBOSA, C.; TAGLIAFERRO, A. A cultura do lúpulo. Piracicaba, São Paulo: Universidade de São Paulo. 2019.

STEFFE, J. F. *Rheological Methods in Food Process Engineering*. 2. ed., Freeman Press, p. 418, 1996.

STEWART, G. G. A brewer's delight. *Chemistry na a Industry*, London, n. 21, p. 706-709, nov. 2000.

TELIS-ROMERO, J.; DITCHFIELD, C. Reologia de produtos alimentícios. In: TADINI et al. *Operações Unitárias na Indústria de Alimentos*. Rio de Janeiro: LTC, 2016. v. 1, cap. 3, p.562.

TING, P. L.; RYDER, D. S. The bitter, twisted truth of the hop: 50 years of hop chemistry. *J. Am. Soc. Brew. Chem.*, v. 75, p. 161–180, 2017. <https://doi.org/10.1094/ASBCJ-2017-3638-01>

TRANHAM, K.; MOSHER, M. *Brewing Science: A Multidisciplinary Approach*. Springer International Publishing. 2016.

TUNDIS, R.; MENICHINI, F.; BONESI, M.; CONFORTI, F.; STATI, G.; MENICHINI, F.; LOIZZO, M. R. Antioxidant and hypoglycaemic activities and their relationship to phytochemicals in *Capsicum annuum* cultivars during fruit development. *Food Science and Technology*, v. 53, p. 370-377, 2013.

VENTURINI FILHO, W. G. *Bebidas alcoólicas: Ciência e tecnológica*. São Paulo: Editora Bucher, v. 1. 2010.

WALSH, B. M.; HOOT, S. B. Phylogenetic relationships of *Capsicum* (Solanaceae) Using DNA sequences from two noncoding regions: the chloroplast atp<sub>b</sub>-rbc<sub>L</sub> spacer region and nuclear waxy introns. *International Journal of Plant Sciences*, v. 162, n. 6, p. 1409–1418, 2001.

WANNENMACHER, J.; GASTL, M.; BECKER, T.; *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.* 2018, 17, 953

ZAINASHEFF, J.; PALMER, J. *Brewing Classic Styles: 80 Winning Recipes Anyone Can Brew*. Brewers Publications. 2007.

ZHUANG, Y.; CHEN, L.; SUN, L.; CAO, J. Bioactive characteristics and antioxidant activities of nine peppers. *Journal of Functional Foods*, v. 4, p.331 –338, 2012.

ZIMMER, A. R.; LEONARDIA, B.; MIRONA, D.; SCHAPOVALA, E.; OLIVEIRA, J. R.; GOSMANNA, G. Antioxidant and anti-inflammatory properties of *Capsicum baccatum*:

From traditional use to scientific approach. *Journal of Ethnopharmacology*, v. 139, p. 228–233, 2012.