



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

Monografia

A HIDROQUÍMICA DA ÁGUA CERVEJEIRA

Davi Rocha de Oliveira

22/007

Orientadora: Profa. Dra. Alexandra Vieira Suhogusoff

SÃO PAULO
2022

Aos meus pais pelo apoio, confiança e paciência, por sempre acreditarem nas minhas ideias malucas. Agora, com a faculdade finalmente chegando ao fim, me sinto confiante para dizer que pude dar orgulho a eles e a mim mesmo; e com a fundação do Zampolas, o melhor bar do mundo, pude mostrar que sou digno de confiança e que ainda sou capaz de muito mais.

Aos meus irmãos pela inspiração que são. À Luana, por ser uma pessoa com princípios admiráveis e tamanho cuidado com as pessoas; ao Natan, por me mostrar que é possível sorrir e encontrar alegria mesmo nos momentos mais difíceis; e, por fim, à Laura, cuja inteligência eu me inspiro para buscar ser sempre mais. O fato de você ser tão incomum torna normal trilhar caminhos alternativos.

À minha orientadora Profa. Dra. Alexandra Vieira Suhogusoff por acreditar em uma ideia tão incomum para trabalhos de Geologia, além de sua instrução e orientação.

À Vitoria, minha companheira e parceira, inteligente e gentil, por toda força, amor e motivação, obrigado pela ajuda.

Aos meus amigos de faculdade, principalmente meu cumpadi, meu parcita para todos os momentos, e a todos aqueles que se reuniam em seu Castelo, por tamanha alegria.

Aos meus queridos clientes e amigos, os famosos Loucos de Kinta.

Ao Gui, da Cervejaria Perdizes, agradeço pela ajuda e pelo conteúdo disponibilizado, a Perdizes é uma grande inspiração para o Zampolas.

RESUMO

O Brasil é um dos maiores produtores de cerveja no mundo e possui um número expressivo de cervejarias que vêm crescendo anualmente, mas poucas delas possuem estrutura e capital para que haja um abastecimento constante de água mineral controlada. De modo geral, a maioria das cervejarias utiliza água de abastecimento urbano (submetendo-a somente ao tratamento para remoção de cloro) e algumas delas utilizam a água subterrânea de uma fonte local, realizando tratamentos para garantir a sua potabilidade. No entanto, apenas as grandes fábricas conseguem realizar um tratamento intensivo de sais para que a água possua a composição desejada. Neste sentido, este trabalho objetiva realizar revisão da literatura referente à composição química da água cervejeira e compreender como os íons presentes nela influenciam em diferentes características da bebida e nas etapas da sua fabricação. Como distintos estilos de cerveja possuem características individuais e a composição química da água possui papel vital para alcançá-las, cada íon presente na água afeta a interação e o equilíbrio entre os outros ingredientes da cerveja, além das características finais dela, como densidade (corpo da cerveja), aroma e sabor. Como o pH é um dos fatores que afeta de maneira mais direta a maioria das reações geoquímicas e bioquímicas da água, controlando a eficiência das reações ao longo da produção de cerveja, a alcalinidade se torna o parâmetro mais importante para a produção da bebida devido a sua capacidade de controlar o pH durante a mosturação. A fabricação deste produto (também chamada de brassagem) consiste, basicamente, no cozimento dos maltes em água potável – que representa mais de 90% da composição da bebida – para produzir o mosto (processo de mosturação), solução de carboidratos, proteínas, glicídios e sais minerais. Após ser resfriada, essa mistura é transportada para um fermentador, onde as leveduras são adicionadas para que ocorra o processo de fermentação aeróbica. Já os lúpulos são responsáveis pela atribuição de aromas característicos e amargor à cerveja (acrescentados durante o cozimento e a fermentação). O tipo de levedura utilizada determina os dois principais grupos de estilos da bebida: enquanto as cervejas do tipo Ale utilizam leveduras de baixa fermentação (*Saccharomyces uvarum*; *carlsbergensis*), as Lager recebem leveduras de alta fermentação (*Saccharomyces cerevisiae*).

ABSTRACT

Brazil is a major beer producer in the world, with its number of breweries rising every year, but only few of them have the structure and the money to keep a constant supply of controlled mineral water (applying only a chlorine removal treatment) and some of them use groundwater from a local source, performing treatments for potability. However, only the large factories are able to perform intensive salt treatment so that the water has the desired composition. In this sense, this work aims to study the chemical composition of the water used in beer production and to understand how its ions affect different beer characteristics and the stages of its manufacture. As different beer styles have individual characteristics and the chemical composition of the water plays a vital role in achieving them, each ion in the water affects the interaction and balance of the other ingredients of beer, it affects also its final characteristics, such as density (body of the beer), aroma, and flavor. Alkalinity (CaCO_3) is the most important parameter in beer production, given its direct influence on mashing performance, since pH is the factor that directly affects most geochemical and biochemical reactions in water, and controls the efficiency of chemical reactions throughout beer production. In general, brewing consists in cooking the malts in potable water - which represents more than 90% of the beverage's composition - to produce wort (mashing process), a solution of carbohydrates, proteins, glycosides, and mineral salts. After cooling, this mixture is moved to a fermenter, where yeasts are added for the aerobic fermentation process to take place. Hops are responsible for characteristic aromas and bitterness in beer (added during cooking and fermentation). The yeast used determines the two main beer groups, while Ale type beers use low fermentation yeasts (*Saccharomyces uvarum*; *carlsbergensis*), Lager beers receive high fermentation yeasts (*Saccharomyces cerevisiae*).

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. METAS E OBJETIVOS.....	3
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	3
4. RESULTADOS (REVISÃO BIBLIOGRÁFICA).....	4
4.1. Cerveja.....	4
4.1.1. História.....	4
4.1.2. Constituintes.....	5
4.1.2.1. Água.....	5
4.1.2.2. Malte.....	6
4.1.2.3. Adjuntos.....	7
4.1.2.4. Lúpulo.....	8
4.1.2.5. Leveduras.....	9
4.1.3. Processo de produção de cerveja.....	10
4.1.4. Classificação e características das cervejas.....	13
4.1.4.1. Tipo Lager.....	14
4.1.4.2. Tipo Ale.....	15
4.2. Água.....	17
4.2.1. Tipos de águas usados na produção de cervejas.....	17
4.2.2. A composição físico-química da água e a sua influência na produção da cerveja.....	18
4.2.2.1. Alcalinidade e Dureza.....	19
4.2.2.2. Fosfato na Mostura e Alcalinidade Residual.....	20
4.2.2.3. pH da Mostura e o Seu Efeito na Cerveja.....	23
4.2.2.4. Íons.....	25
4.2.2.4.1. Cálcio.....	25
4.2.2.4.2. Magnésio.....	26
4.2.2.4.3. Sódio.....	27
4.2.2.4.4. Cloreto.....	28
4.2.2.4.5. Sulfato.....	28
4.2.2.4.6. Carbonato e Bicarbonato.....	29
4.2.3. Tratamentos de água cervejeira para cervejaria.....	30
4.2.3.1. Remoção de sólidos em suspensão: filtração mecânica.....	31
4.2.3.2. Remoção de sólidos dissolvidos: ferro e Manganês.....	31
4.2.3.3. Remoção de sólidos dissolvidos: troca iônica.....	31

4.2.3.3.1.	<i>Resina catiônica de ácido fraco (WAC): abrandamento comum da água</i>	32
4.2.3.3.2.	<i>Resina catiônica de ácido forte (SAC): abrandamento completo da água</i>	32
4.2.3.3.3.	<i>Resina aniônica de base fraca (WBA): tratamento de alcalinidade</i>	32
4.2.3.3.4.	<i>Resina aniônica de base forte (SBA): tratamento de alcalinidade</i>	32
4.2.3.4.	<i>Remoção de sólidos dissolvidos: tecnologias de membrana</i>	33
4.2.3.5.	<i>Remoção de contaminantes orgânicos: carvão ativado</i>	33
4.2.3.6.	<i>Remoção de gases dissolvidos: desaeração</i>	33
5.	CONCLUSÕES	34
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	34

1. INTRODUÇÃO

A produção de cervejas compreende a arte de unir ingredientes, como lúpulo e leveduras, e condições físico-químicas para criar uma combinação consistente que traga características específicas para a bebida, sendo a sua base a fermentação de açúcares redutores presentes em cereais maltados (principalmente cevada e trigo). A complexidade da cerveja e suas possibilidades de sabores exprimem a variedade de gostos e culturas no mundo. No caso do Brasil, por exemplo, em que há uma vasta cultura cervejeira, foram registradas, ao final de 2020, cerca de 14.000 cervejarias no Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA, 2020). Com esse número, é possível estimar um total de 140.000 cervejas diferentes à venda no país, já que cada cervejaria produz, em média, 10 estilos distintos (Stewart *et al.*, 2011).

De modo geral, o desenvolvimento de uma cerveja consiste no cozimento dos maltes em água potável – a qual representa mais de 90% da composição da bebida – para produzir o mosto, solução de carboidratos, proteínas, glicídios e sais minerais. Após ser resfriada, essa mistura é transportada para um fermentador, onde as leveduras são adicionadas para que ocorra o processo de fermentação aeróbica. Os lúpulos, por sua vez, responsáveis pela atribuição de aromas característicos e amargor à cerveja, são acrescentados durante o cozimento e a fermentação. O tipo de levedura utilizada determina os grupos de estilos da bebida (Ale e Lager), por exemplo: enquanto as cervejas do tipo Ale utilizam leveduras de baixa fermentação (*Saccharomyces uvarum*; *carlsbergensis*), as Lager recebem leveduras de alta fermentação (*Saccharomyces cerevisiae*) (Stewart *et al.*, 2017).

Dentro desses dois grupos principais de cerveja (Ale e Lager), há uma variação de estilos que são classificados de acordo com as suas características físicas, como graduação alcoólica (ABV), nível de amargor (IBU), cor e densidade, e sensoriais, como aparência, aroma, sabor e sensação de boca, além do método de produção e a origem e qualidade dos insumos utilizados para a bebida (Rosa & Afonso, 2015). Essas características acarretam distintos perfis sensoriais e técnicos a cada cerveja criada, ou seja, todas as cervejas, como Pilsen (Lager), India Pale Ale (IPA) e Stout (ambas Ale), possuem propriedades individuais que as definem dentro do seu estilo. O *Beer Certification Program* (BCP), organização norte-americana sem fins lucrativos,

é a principal referência na classificação desses estilos de cervejas, visto que as avalia de acordo com as propriedades físicas e sensoriais mencionadas acima.

A água utilizada na fabricação de cervejas como ingrediente é chamada de água cervejeira e sua composição química impacta diretamente nas características das cervejas. A influência na cerveja de cada elemento químico presente na água é bem estudada e os íons de maior relevância são o cálcio, magnésio, carbonato (alcalinidade), sódio, cloreto e sulfato. Por exemplo, a razão entre íons de sulfato e cloreto na água pode afetar significativamente o equilíbrio entre o amargor do lúpulo e o dulçor do malte, além de alterar a percepção de corpo da cerveja. Íons de sódio, magnésio, cobre e zinco podem ser muito benéficos em pequenas quantidades, mas, quando em excesso, produzem sabores desagradáveis (Kaminski *et al.*, 2021).

A busca da água ideal para um estilo específico de cerveja diz respeito ao impacto que a mesma terá no resultado final da cerveja, e, para que esta se enquadre dentro de um estilo específico, a água precisa possuir determinadas características físico-químicas. Utilizar uma água com o balanço iônico recomendado para o tipo de cerveja almejado trará mais facilmente as especificações desejadas e, para isso, a cervejaria pode optar por construir sinteticamente a composição química da água, adicionando os sais que irão, posteriormente, solubilizarem-se em cátions e ânions, de acordo com Kaminski *et al.* (2021).

Por fim, do ponto de vista da popularidade da bebida, uma das razões que contribuem para o seu consumo expressivo ao longo da história é justamente o fato de que o processo de sua produção torna a água local biologicamente segura para consumo após receber os tratamentos para torná-la potável.

2. METAS E OBJETIVOS

Este trabalho tem como base a análise e caracterização química das águas utilizadas na produção de cervejas. O objetivo principal, então, é compreender a influência dessa composição química da água cervejeira nas particularidades de diferentes estilos de cervejas e verificar quais águas minerais do estado de São Paulo seriam as melhores para cada um desses estilos.

Para isso, a monografia parte de objetivos mais específicos. Em um primeiro momento, há uma revisão bibliográfica sobre a água cervejeira e a sua influência ao longo do processo de fabricação da bebida. Essa revisão consiste, de maneira geral, na descrição do processo de produção de cervejas, ingredientes e principais características.

Inicialmente pretendia-se realizar um levantamento e tratamento estatístico de análises químicas da composição química da água utilizada por diferentes cervejarias. Catorze cervejarias foram entrevistadas, porém apenas uma disponibilizou dados que fossem relevantes para o trabalho, 4 se recusaram a disponibilizar os dados, e o restante utiliza água da rede pública de abastecimento. Devido a ausência de dados úteis para o trabalho esta análise foi descartada.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho foi realizado em uma frente, a pesquisa bibliográfica, que foi realizada a partir de plataformas digitais, como o Cervo da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações da USP, além de ferramentas de pesquisa, como o *Google Scholar*, *Scopus*, *Science Direct*, entre outros. O principal objetivo do levantamento bibliográfico foi compilar as informações já existentes sobre temas relevantes para a confecção deste trabalho.

Para entender como a água impacta na cerveja, foi necessário voltar na história da bebida e apresentar, de forma breve, seus ingredientes e o modo como interagem entre si. A partir disso, tornou-se viável a compreensão sobre a composição química da água e a sua influência sobre as características da cerveja – conteúdo necessário para desenvolver novas cervejas ou reproduzir estilos. Por fim, essa análise também permitiu indicar quais águas possuem um perfil semelhante ao que é considerado

como referência para alguns dos estilos mais tradicionais que conhecemos. Ao longo do trabalho também foram apresentados os íons mais relevantes para a produção de uma cerveja e o seu comportamento, além do teor referência para os principais estilos.

4. RESULTADOS (REVISÃO BIBLIOGRÁFICA)

4.1. Cerveja

4.1.1. História

O registro mais antigo sobre cervejas foi encontrado na Mesopotâmia há 5.000 anos, mas estima-se que a humanidade tenha começado a utilizar bebidas fermentadas há cerca de 30 mil anos (Maltman, 2019). Associada à cultura de grãos de milho, centeio e cevada, a cerveja difundiu-se entre os povos da Suméria, Babilônia e Egito, além das civilizações grega e romana. Os povos germânicos foram os primeiros a empregar o lúpulo na Idade Média, por volta de 820 d.C., e atribuíram à bebida suas características atuais, tornando a cerveja um insumo onipresente na Europa. Ela era consumida em quase todas as refeições e produzida com a variedade de grãos disponíveis na época e com qualquer aditivo que pudesse ser feito na região (Mega *et al.*, 2011; Maltman, 2019).

Durante a Revolução Industrial, os ingredientes não precisaram mais ser produzidos no próprio local. O malte e o lúpulo puderam ser transportados das regiões agricultoras em larga escala para zonas mais estratégicas, fazendo com que mais regiões tivessem acesso a ingredientes de qualidade. As cervejas produzidas em Burton upon Trent, na Inglaterra, por exemplo, destacavam-se na época, já que a alta concentração de sulfato de cálcio (CaSO_4), presente na própria água utilizada pelas cervejarias da região, permitia que a bebida recebesse uma quantidade muito maior de lúpulo em sua composição, o que a tornava muito mais estável do que as produzidas em outros locais (fator crucial em uma época anterior à pasteurização) e também menos alcoólicas (Figura 1). Com isso, mineradoras da região passaram a vender gesso para cervejarias de outras cidades, abrindo a possibilidade de diluição do material na água, com o intuito de que a composição da bebida fosse mais próxima à de Burton upon Trent. No entanto, essa tática acabou se mostrando ineficaz por conta da baixa solubilidade dos pedaços de gesso (Maltman, 2019).

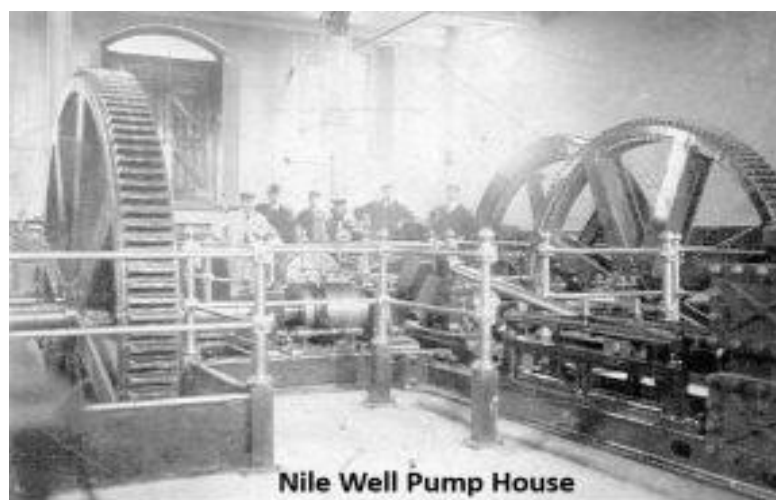


Figura 1: Casa de bombeamento de água em Burton upon Trent, fonte (nbcarchives, 2022).

No caso do Brasil, embora a cerveja tenha chegado no século XVIII, com a colonização holandesa no Nordeste, foi somente em 1808, com a reabertura dos portos e a chegada da Família Real portuguesa, que de fato essa bebida se instalou no país de forma legal e passou a ser importada por comerciantes estrangeiros (de Paula Santos, 2003). Sendo os ingleses os maiores produtores do mundo na época, eles dominaram o mercado nacional com a Porter e a Pale Ale, oriundas de Burton upon Trent, por um longo período. Apesar disso, a produção de uma cerveja de fato brasileira iniciou-se somente no final da década de 1820, no Rio Grande do Sul (de Paula Santos, 2003).

4.1.2. Constituintes

4.1.2.1. Água

A água é o principal componente da cerveja em volume. Corresponde de 92 a 95% da sua composição e é utilizada para outras funções em diversas etapas do processo: a cada litro de cerveja produzido, são utilizados, em média, 5 litros de água.

Segundo Stewart *et al.* (2011), a água utilizada na fabricação de cervejas pode ser classificada como:

- Água cervejeira – água potável utilizada diretamente na cerveja como ingrediente e para correção do teor alcoólico da bebida. Principal objeto de estudo desta Monografia, para cada litro de cerveja produzido, consomem-se em média 2,7 litros dessa água.
- Água de processo – idealmente potável, é aplicada na limpeza e higienização de superfícies que entram em contato com a cerveja, como recipientes, tubulações e contêineres. A cada litro de cerveja produzido, são consumidos aproximadamente 2,1 litros desse tipo de água.
- Água de serviço – são águas de processo que necessitam de um tratamento específico para a função desempenhada, como no caso da utilizada na pasteurização e na refrigeração. Utiliza-se somente 0,2 litro dessa água por litro de cerveja produzido.

A quantidade e proporção dos sais minerais dissolvidos na água cervejeira afetam o sabor da cerveja e a percepção do malte, lúpulo e dos produtos da fermentação, influenciando também no desempenho das leveduras.

4.1.2.2. *Malte*

O malte é o ingrediente base para a produção de uma cerveja, pois fornece os atributos fundamentais para definir uma bebida como tal, incluindo cor (escala medida em EBC, a mais utilizada no Brasil e na Europa, ou SRM), aroma e sabor, além de permitir a fermentação alcoólica - processo em que, mediante a conversão do malte em mosto, os carboidratos são transformados em álcool por meio das leveduras. Ao longo do processo de brassagem os carboidratos, as proteínas e lipídios são transformados em amidos, açúcares, proteínas, aminoácidos e ácidos graxos por meio de enzimas, moléculas protéicas responsáveis por facilitar reações químicas. O termo malte refere-se aos grãos de cereais que sofreram a malteação, processo que ocorre em um período de cinco a seis dias e que consiste de três etapas: umidificação dos grãos, germinação controlada e secagem dos grãos. O objetivo da malteação é de criar componentes fermentáveis e não fermentáveis na produção de uma cerveja (Porto, 2011; Mallett, 2021).

O principal malte empregado na produção de cervejas é o de cevada (Figura 2), mas a malteação pode ser feita em diversos grãos, como no trigo ou até mesmo

no milho. A quantidade de grãos e maltes utilizados em uma receita depende do resultado desejado. Estes podem ser divididos entre os maltes base e os maltes especiais, de modo que a sua proporção varia de acordo com cada estilo. Os maltes base fornecem os elementos essenciais necessários para produzir cerveja, ou seja: os açúcares fermentáveis, Amino Nitrogênio Livre (FAN) e a base do sabor maltado. Já os maltes especiais geram complexidade e diversidade, visto que grãos alternativos e processos não convencionais podem criar muitos maltes distintos que melhoram ou pioram a qualidade da cerveja (Mallett, 2021).



Figura 2: Malte de cevada antes de sofrer a moagem
(clubedomalte, 2022)

4.1.2.3. *Adjuntos*

Adjuntos são açúcares e cereais não maltados não essenciais à cerveja. Eles são utilizados como matéria-prima substituta do malte para corrigir propriedades indesejadas na cerveja, mas não interferem em sua qualidade. A principal função do adjunto é realizar a hidrólise do malte a partir de açúcares fermentáveis, principalmente glucose, maltose e maltotriose (Stewart *et al.*, 2017). Os adjuntos proporcionam uma redução dos custos de produção, pois possibilitam o emprego de uma menor quantidade de energia durante o processamento, sendo os mais utilizados o milho, trigo, arroz, cevada não malteada e mandioca, além de xaropes e adjuntos açucarados em pó (D'Avila *et al.*, 2012).

Quando há uso de uma alta proporção de cereais sem maltear na elaboração de cervejas, o malte empregado em conjunto pode ser proveniente de plantas de cevada de seis fileiras de grãos por espigas. Apesar de apresentar uma qualidade inferior para a malteação quando comparado ao obtido de plantas de duas fileiras de grãos por espigas (como o milho, principal adjunto utilizado), possui alto nível de atividade enzimática (Varnam & Sutherland, 1997).

4.1.2.4. Lúpulo

O lúpulo (*Humulus lupulus*), utilizado na fabricação de cerveja, é a flor seca da planta fêmea do lúpulo. Originário da Ásia (provavelmente da China), ela é cultivada principalmente no Hemisfério Norte, preferencialmente em zonas temperadas da Europa (com destaque para a produção alemã) e países como EUA e China, mas tem sido produzida com sucesso em muitas partes do Hemisfério Sul.

O lúpulo é responsável por proporcionar principalmente aroma e amargor à cerveja - além do sabor característico do lúpulo. Este componente é essencial para o impacto organoléptico total da cerveja, a estabilidade do sabor e a retenção da espuma, além de ser antimicrobiano, inibindo o crescimento de organismos que poderiam danificar o sabor e a aparência da bebida (Rodrigues *et al.*, 2015; Stewart *et al.*, 2017; Hieronymous, 2020).

Das partes do lúpulo, a mais relevante para a produção de uma cerveja é a glândula lupulina (Figura 3), visto que ela contém resinas flexíveis (ácidos alfa e beta) e rígidas, óleos e polifenóis. Os iso-alfa-ácidos isomerizados durante a fervura do mosto são os maiores contribuintes para o amargor na maioria das cervejas, correspondendo, em grande parte, à escala de intensidade de amargor, expressa como IBU (*International Bitterness Units Scale*). O IBU descreve em números o nível de amargor de uma cerveja e seu valor é calculado por softwares de receita, mas no geral é algo mais subjetivo utilizado para orientar cervejarias e consumidores (Hieronymous, 2020). Já os óleos da planta são os principais responsáveis pelo aroma e sabor do lúpulo na bebida.

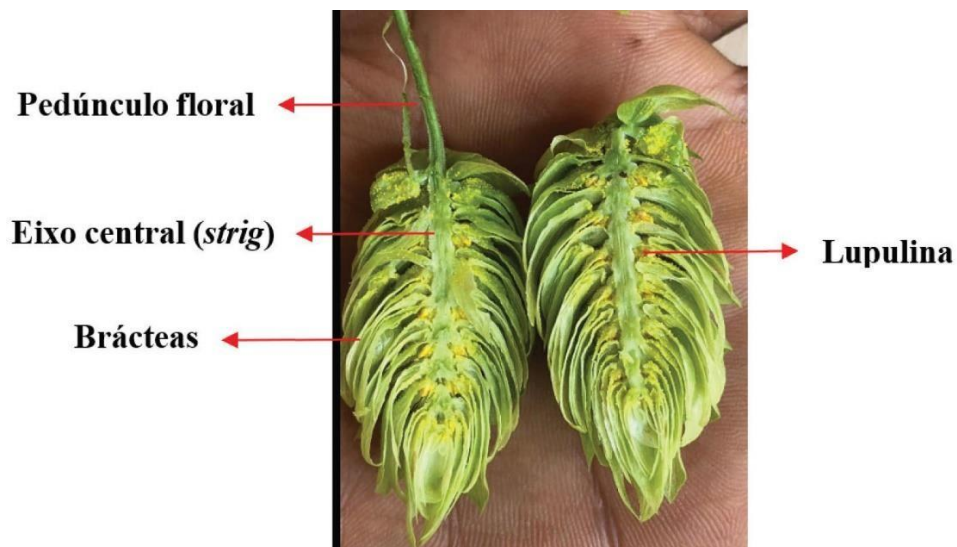


Figura 3: Estrutura interna do lúpulo e seus componentes, pedúnculo floral, eixo central, brácteas e lupulina (Durello et al., 2019).

4.1.2.5. Leveduras

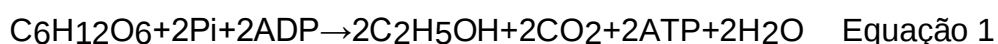
Os microrganismos conhecidos como leveduras são, predominantemente, indivíduos unicelulares do Grupo Fungi. Geralmente, a cerveja depende do fermento para o desenvolvimento de seus sabores, sendo que a menor diferença entre as variedades empregadas na fabricação têm grande importância técnica (de Oliveira, 2011; Stewart et al., 2017). Para a produção cervejeira, são utilizados diversos tipos de leveduras, de modo que cada uma transmite suas características próprias e ideais para diferentes tipos da bebida. Essas leveduras podem ser divididas em duas categorias que acabam por definir os dois principais grupos de cerveja:

- Lager – são leveduras de baixa fermentação (*Saccharomyces uvarum*; *carlsbergensis*), que não fermentam bem em altas temperaturas (8 a 15°C) e floculam no final da fermentação primária ou principal (7 a 10 dias), sendo coletadas na base do fermentador;
- Ale – são leveduras de alta fermentação (*Saccharomyces cerevisiae*), que não fermentam bem em baixas temperaturas (18 a 25°C) e, no final da fermentação (3 a 5 dias), as células adsorvidas nas bolhas de CO₂ são carregadas até a superfície do mosto onde são coletadas.

O papel do fermento é principalmente o de transformar os carboidratos fermentáveis em etanol e CO₂, gerando como subprodutos ésteres, ácidos e álcoois

superiores (Rosa & Afonso, 2015). Dependendo da receita, a levedura metaboliza cerca de 50 a 80% do extrato do mosto, convertendo uma média de 46,3% dele em dióxido de carbono, 48,4% em etanol e 5,3% em novas células de levedura.

Quando a levedura fermenta uma solução, ocorre a transformação de uma substância açucarada em uma alcoólica, segundo a reação de fermentação alcoólica expressa na Equação 1, com as vantagens adicionais de um pH menor – o que promove uma proteção contra bactérias – e a produção de compostos de sabor fundamentais para a cerveja (por exemplo ésteres, álcoois de alto peso molecular, compostos de enxofre, etc.) (White & Zainasheff, 2020).



4.1.3. Processo de produção de cerveja

A primeira fase da produção da cerveja é a brassagem, que consiste no cozimento dos maltes e dos lúpulos para obtenção do mosto. O processo deve ser iniciado com a moagem do malte, que é posteriormente adicionado à água cervejeira, na sala de brassagem (figura 4) essa mistura é aquecida até uma temperatura máxima de 72°C para que o amido seja convertido em monossacarídeo. A mistura é mantida a uma determinada temperatura ideal (próxima de 72°C) diferente para cada estilo de cerveja e, em seguida, se faz a filtragem da mosturação para remoção dos restos do malte, sendo o líquido residual o mosto (Rosa & Afonso, 2015).



Figura 4: Sala de brassagem da Cervejaria Perdizes, na imagem é possível observar as panelas em que é realizado o cozimento da cerveja.

O mosto deve ser fervido - momento em que ocorre a adição dos lúpulos aromáticos - para que haja a dissolução do lúpulo e isomerização dos alfa-hidroxiácidos em isoalfa-hidroxiácidos (quanto maior o tempo da reação, maior o amargor da cerveja) e esterilização (Stewart *et al.*, 2017). O mosto precisa ser resfriado, saindo de um ponto de fervura para uma temperatura em que possa ocorrer a fermentação. Posteriormente, ele deve receber oxigênio ou ar atmosférico para gerar as condições ideais de ativação das leveduras (Rosa & Afonso, 2015; Stewart *et al.*, 2017).

Após o resfriamento, o mosto é transferido para o fermentador (figura 5), onde as leveduras (fermento) são adicionadas e o sistema isolado para que a fermentação ocorra em ambiente anaeróbico, visto que esta é a fase mais importante para definir o paladar da cerveja. A cerveja permanecerá no fermentador por cerca de 15 dias para que ocorra a maturação e, após esse período, ela pode ser filtrada (em alguns

casos específicos) e envasada, momento em que recebe estabilizantes e outras substâncias para corrigir determinados aspectos da cerveja como o sabor, graduação alcoólica, cor, entre outros.



Figura 5: Fermentador de 30L da cervejaria perdizes.

No entanto, algumas cervejarias optam por utilizar o processo de pasteurização para que a vida útil da cerveja seja prolongada (Rosa & Afonso, 2015). A pasteurização é um processo em que a cerveja é submetida a um aquecimento de 60 a 70°C e, posteriormente, é resfriada para eliminar micro-organismos prejudiciais à cerveja (Rosa & Afonso, 2015). Cervejas artesanais armazenadas em latas e barris não são pasteurizadas e, por isso, possuem paladar mais fresco e mantêm suas características originais. Porém, essas cervejas exigem refrigeração, diferentemente daquelas que são envasadas, que por serem em sua maioria pasteurizadas, apresentam uma data de validade mais longa.

4.1.4. Classificação e características das cervejas

O estilo de uma cerveja é definido pela combinação de características, determinadas principalmente pela associação e qualidade dos ingredientes (água, malte, lúpulo e levedura) utilizados em sua produção. Cor, corpo (viscosidade), sabor, aroma, amargor (medida em IBU – *International Bitter Unit*), espuma, graduação alcoólica (cuja unidade de medida é a ABV - *Alcohol by Volume*), *drinkability* (termo que trata da facilidade de consumo de uma cerveja) e densidades inicial e final são especificidades relevantes de uma cerveja. Segundo Stewart *et al.* (2011) essas especificidades são influenciadas de uma forma particular de acordo com os tipos de equipamentos utilizados em cada etapa da fabricação da cerveja; a moagem dos maltes; a brassagem; a temperatura e duração do aquecimento do mosto; a temperatura de fermentação; o tempo de maturação; e a qualidade da filtragem.

A classificação de cervejas é mundialmente aceita. Há um consenso na literatura de todos os países, incluindo a brasileira, de que elas são divididas em dois grandes grupos baseados no processo fermentativo utilizado: Lager e Ale. São classificadas na legislação brasileira cinco características de uma cerveja (Decreto nº 2.314, de 4 de setembro de 1997, e Lei nº 8.918, art. 66, de 14 de julho de 1994), apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Classificação das cervejas no Brasil (Rosa & Afonso, 2015).

Critério	Classificação	Característica
Fermentação	Alta Fermentação	18-25°C
	Baixa fermentação	5-15°C
Extrato Primitivo (quantidade de substâncias dissolvidas no mosto, que deu origem à cerveja)	Leve	Acima de 5% a 10,5% em massa
	Comum	Acima de 10,5% a 12,5% em massa
	Extra	Acima de 12,5% a 14,0% em massa
	Forte	Acima de 14,0% em massa
Cor	Clara	Menos de 20 unidades EBC
	Escura	20 ou mais unidades EBC
Teor Alcoólico	Sem álcool	menos de 0,5% do volume de etanol
	Alcoólica	igual ou maior que 0,5% em volume de etanol
Teor de Extrato (final)	Baixo	Até 2% em massa
	Médio	2% a 7% em massa
	Alto	Mais de 7% em massa

4.1.4.1. Tipo Lager

Tipo mais consumido no Brasil (mais de 99%) e no mundo, são cervejas de fermentação mais lenta e de baixa temperatura, com a graduação alcoólica geralmente entre 4 e 5%. Originárias dos povos germânicos, por volta dos anos 1.400, seus estilos mais populares são Pilsen, Pale Lager, American Standard Lager, Vienna Lager, Bock, Schwarz bier, Malzebier e München Helles. Rosa e Afonso (2015) destacam alguns estilos de cervejas Lager:

- Bock – É uma cerveja escura, originária do norte da Alemanha, de sabor mais para o doce do que para o amargo, e alto teor alcoólico. Muito popular por seu sabor forte e encorpado, possui uma variedade conhecida como Doppelbock (bock duplo), com graduação alcoólica de até 7,5%.
- Pilsener (Pilsen ou Pils) – Cerveja desenvolvida em 1842 em Pils, na Boêmia, hoje parte da República Tcheca (Plzeň). É dourada e translúcida, sabor suave (geralmente de pão) e possui aroma de flores. Este estilo (figura 6) engloba as cervejas comerciais comuns brasileiras, que por conta do emprego do arroz e do milho como adjuntos do malte e de uma maior diluição em água para redução de custos, elas possuem baixo teor de sais dissolvidos.



Figura 6: Cerveja clara do tipo pilsener da Cervejaria Casamalte, localizada na cidade Novo Horizonte, São Paulo.

4.1.4.2. Tipo Ale

São cervejas de fermentação de mais alta temperatura. Sua origem remonta a um processo antigo, visto que o termo "Ale", de origem celta, era utilizado na Inglaterra até a introdução das cervejas Lager. Eram as únicas disponíveis até meados do século XIX, quando foi desenvolvida a fermentação à baixa temperatura. Por conta da fermentação quente, as cervejas do tipo Ale possuem sabor incomparavelmente mais destacado. Alguns estilos são: India Pale Ale (IPA), American Pale Ale (APA), Stout, Porter, Weissbier e Witbier (cervejas de trigo), Red Ale e Belgian Blond Ale (Rosa & Afonso, 2015). Os estilos mais populares de cervejas Ale são (Mega *et al.*, 2011):

- Pale Ale – era o termo utilizado na Inglaterra para descrever as cervejas mais claras do que as Brown Ale. Possui cor clara, comumente remetendo ao cobre, e seu sabor tende ao terroso com notas florais. Atualmente, há diversos tipos de cerveja do tipo Pale Ale, partindo desde uma Mild Ale (cerveja mais suave), até mais amargas, como a Indian Pale Ale (figura 7) e a American Pale Ale, que são extremamente populares por seus sabores intensos e aromas florais.



Figura 7: Cerveja de cor âmbar tipo West Coast double IPA, produzida pela cervejaria Wayne 190, localizada em Sorocaba, município de São Paulo.

- Stout - cerveja criada originalmente na Irlanda, é muito escura (figura 8), com uma coloração preta por conta de seus maltes torrados. Seu paladar é preferivelmente seco com sabor adocicado ou torrado, podendo ser do tipo Dry Irish (cerveja de origem irlandesa, seca, encorpada e cremosa, com sabores de caramelo e café), Foreign Style Stout (semelhante à Dry Irish, com maior teor alcoólico) ou Imperial Stout (alto teor alcoólico e sabor frutado, doce ou semidoce). No Brasil, a referência de Stout comercial é a Caracu.



Figura 8: Cerveja preta tipo stout, produzida pela cervejaria Wayne 190, localizada em Sorocaba, São Paulo.

- Weissbier – cerveja clara (figura 9) popular produzida principalmente pelas grandes cervejarias alemãs. Característica da região sul da Alemanha (Baviera), ela é feita à base de trigo, mas pode conter milho e mesmo frutas. São cervejas claras, bastante refrescantes e aromáticas, e podem ser denominadas como Hefe-Weiss ou Hefe-Weizen, visto que o prefixo “Hefe-“ significa fermento, indicando que a cerveja não foi filtrada e ainda resta algum fermento em sua composição. Por conta disso, a cerveja pode apresentar uma turbidez.



Figura 9: Cerveja clara do tipo Weissbier produzida pela cervejaria Sapucaí, de Sapucaí Mirin, Minas Gerais.

4.2. Água

4.2.1. Tipos de águas usados na produção de cervejas

Antigamente, as cervejarias que possuíam sua própria água, como poços ou nascentes, tornavam-se uma região produtora de cerveja com características típicas devido à qualidade e composição da água. A Tabela 2 mostra a composição química da água de alguns pólos cervejeiros, antigos e atuais, na Europa (Burton upon Trent, Munique, Londres e Plzeň). Na cidade de Burton upon Trent, na Inglaterra, a água possui uma dureza elevada, devido à alta concentração dos íons liberados pela dissolução de CaSO_4 , e suas cervejas são tradicionalmente amargas, fortes e claras. As águas de Londres e Munique são mais alcalinas e suas cervejas fabricadas são escuras e com sabores mais suaves. No caso de Londres, são produzidas tradicionalmente cervejas Ale leves e marrons; já em Munique, lager escuras e

levemente lupuladas. A água de Plzeň, localizada na República Checa, é extremamente mole, com um conteúdo mineral baixo, e suas cervejas são tradicionalmente pale lagers muito lupuladas (Stewart *et al.*, 2017).

A água é um dos fatores que tornam única a cerveja de determinada região. A cerveja Pilsner é definida com um estilo próprio por conta da região de Plzeň apresentar uma água muito mole. De modo geral, recriar um estilo com água muito diferente é um dos maiores desafios de uma cervejaria, sendo mais fácil construir sinteticamente a água desejada. A Tabela 2 mostra a composição da água tida como referência para os principais estilos de cerveja (Kaminski *et al.*, 2021).

Tabela 2 – Composição referência (em ppm) para os principais estilos de cerveja. O valor RA^{xxvi} (alcalinidade residual) é dado em função de CaCO₃ em partes por milhão (ppm) e representa a dureza (Kaminski *et al.*, 2021).

Cidade/Estilo	Ca ²⁺	Mg ²⁺	HCO ₃ ⁻	Na ⁺	Cl ⁻	RA	Soma (+)	Soma (-)
Plzeň/ Pilsner	10	3	3	3	4	-6	0,7	0,9
Dublin /DryStout	118	4	319	12	19	175	6,9	6,8
Dortmund /ExportLager	225	40	180	60	60	-36	14,5	14,4
Viena / ViennaLager	200	60	120	8	12	-80	5,4	5,4
Munique /Dunkel	76	18	152	?	2	60	5,4	5,4
Londres/Bitter	52	32	104	86	34	29	4,6	4,6
Edimburgo /Scottish Ale	125	25	225	55	65	80	9	9
Burton/ IndiaPale Ale	362	24	320	54	16	-3	18,1	18,1

4.2.2. A composição físico-química da água e a sua influência na produção da cerveja

Cada elemento químico presente na água cervejeira e sua concentração afetam tanto as características físicas de uma cerveja, quanto o sabor – as papilas gustativas conseguem identificar sabor de doce, salgado, azedo, amargo e umami (glutamato) –, influenciando na forma como os ingredientes interagem e o seu rendimento. A manipulação e controle da composição química da água exigem capital e infraestrutura, uma vez que são utilizados muitos litros de água mensalmente. Por essa razão, a maioria das cervejarias na região metropolitana de São Paulo utiliza a água do sistema municipal de abastecimento, restringindo às grandes cervejarias o uso da água mineral. A RDC/274 (ANVISA, 2005) caracteriza as águas minerais como

obtidas diretamente de fontes naturais ou artificialmente captadas de origem subterrânea. Elas são determinadas pelo conteúdo definido e constante de sais minerais, além da presença de oligoelementos.

4.2.2.1. Alcalinidade e Dureza

A alcalinidade é o parâmetro mais importante para produção de cerveja pois influencia diretamente no desempenho da mostura (Kaminski *et al.*, 2021), e é definida como a capacidade que um sistema aquoso possui de neutralizar ácidos fortes, ou seja, quanto ácido a solução consegue absorver sem alterar o pH. Para isso, uma base — por exemplo hidróxido (OH^-), carbonato (CO_3^{2-}), bicarbonato (HCO_3^-), etc. — deve reagir para neutralizar o íon de hidrogênio (H^+). Tradicionalmente, a alcalinidade tem sido expressa em miligramas por litro de carbonato de cálcio (CaCO_3), uma vez que o calcário é a principal fonte de alcalinidade (Boyd *et al.*, 2016; Kaminski *et al.*, 2021).

A alcalinidade da água é determinada pelo teor de carbonato – formado quando as águas subterrâneas ácidas (com CO_2 dissolvido) reagem com o calcário (CaCO_3) ou com a dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) – e a sua quantidade dissolvida depende da pressão parcial do CO_2 . Águas que possuem uma elevada alcalinidade tornam o processo de controle de pH do mosto e da cerveja muito mais difícil, visto que a alcalinidade eleva o pH da mostura para valores superiores ao pH alvo (5,2 — 5,6). Idealmente, o pH da água deve estar entre 6 e 9 (Boyd *et al.*, 2016; Kaminski *et al.*, 2021).

A classificação da água quanto à dureza, expressada como a contribuição de íons individuais, é a mais utilizada na indústria cervejeira. Essa dureza é a propriedade referente ao teor de determinados sais, principalmente de cálcio e de magnésio, de solubilizarem de forma semelhante, formando CaCO_3 (Boyd *et al.*, 2016).

Embora sejam conceitos distintos, dureza e alcalinidade são expressas na mesma unidade (ppm de CaCO_3), mas por razões diferentes. Quando uma água com altas concentrações de bicarbonato e Ca^{2+} é fervida, há a produção de CaCO_3 , formando precipitados endurecidos segundo a Equação 2 (Stewart *et al.*,

2017):



Equação 2

Outros sais associados, como ferro, alumínio, cobre e zinco, são precipitados ou mascarados antes da determinação da dureza da água (Baccan *et al.*, 2004).

Tabela 3 – Classificação das faixas de dureza da água (Mendonça & Flores, 2017).

Classificação quanto à dureza	Nível de dureza (ppm de CaCO ₃)
Água normal	< 60
Água moderadamente dura	61 a 120
Água dura	121 a 180
Água muito dura	> 180

4.2.2.2. Fosfato na Mostura e Alcalinidade Residual

O malte contém aproximadamente 1% de sua massa na forma de íons fosfato (P₂O₅) em sua composição, sendo esse elemento peça-chave para regulação do pH da mostura para faixas aceitáveis de ativação das enzimas. O fosfato é hidrolisado durante a mosturação, processo catalisado pela enzima fitase, que é facilmente desnaturada pela torrefação em quase todos os maltes - exceto os mais claros -, mas ocorre por outros meios.

O fosfato inorgânico (principalmente na forma de H₂PO₄⁻, H₃PO₄, HPO₄²⁻ e PO₄³⁻) na presença de íons de cálcio precipita majoritariamente na forma de hidroxiapatita (Ca₁₀(PO₄)₆(OH)₂), além de outros sais (de Lane, 2004; Kaminski *et al.*, 2021). Quando o pH do meio está elevado, para que este seja reduzido permitindo a precipitação dos fosfatos de cálcio, é necessário uma série de reações codependentes entre si, mas que podem ser resumidas na seguinte reação (Kaminski *et al.*, 2021):



Equação 3

As reações que atuam na precipitação dos fosfatos de cálcio liberam íons H^+ que reagem com o carbonato dissolvido para formar água e CO_2 , reduzindo assim o pH do sistema. Portanto, a redução da alcalinidade é geralmente limitada pela quantidade de cálcio disponível na água e no mosto (Kaminski *et al.*, 2021). Os gráficos abaixo (1 e 2) mostram o cálcio necessário para que haja neutralização do meio em diferentes situações, demonstrando que, para saturar uma solução com alto teor de fosfato (gráfico 1), é necessário menos cálcio do que em uma solução com pouco fosfato (gráfico 2) (de Lane, 2004). Quando a alcalinidade possui valores superiores ao limite apto a ser neutralizado devido à insuficiência de cálcio, é nomeada "alcalinidade residual" (de Lane, 2004; Kaminski *et al.*, 2021).

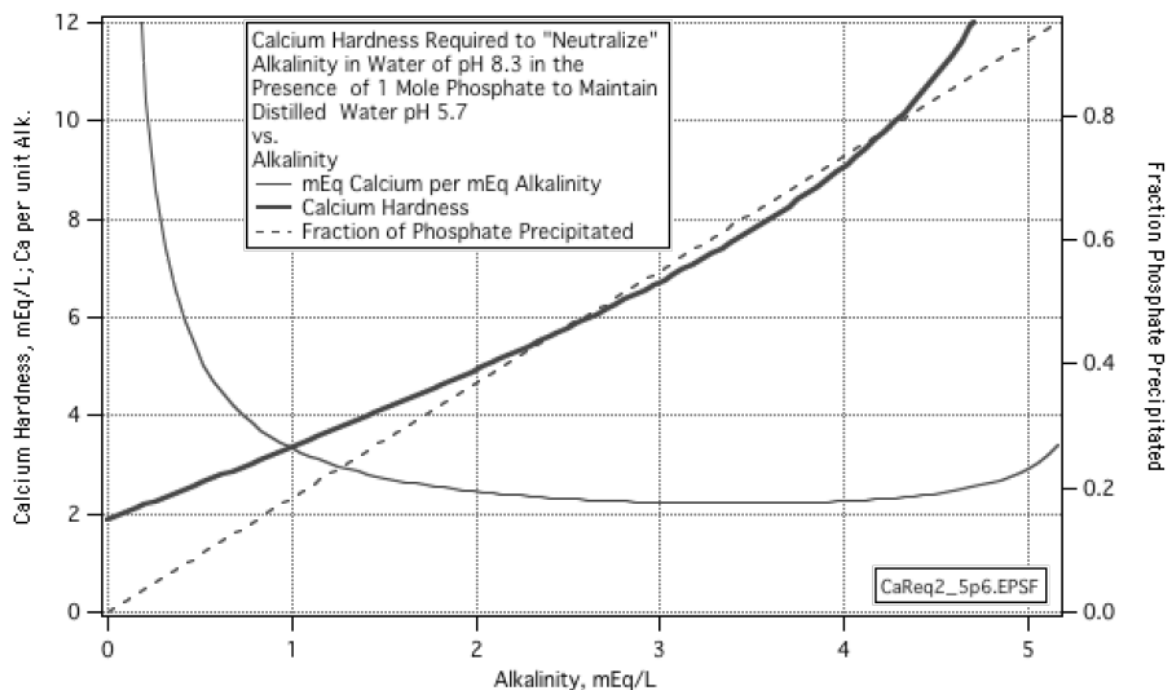


Gráfico 1: Cálcio necessário para manter o pH de água destilada do mosto (5,7) em um mosto com fosfato total de 1Mol/l em função da alcalinidade da mostura (pH 8,3) (de Lange, 2004).

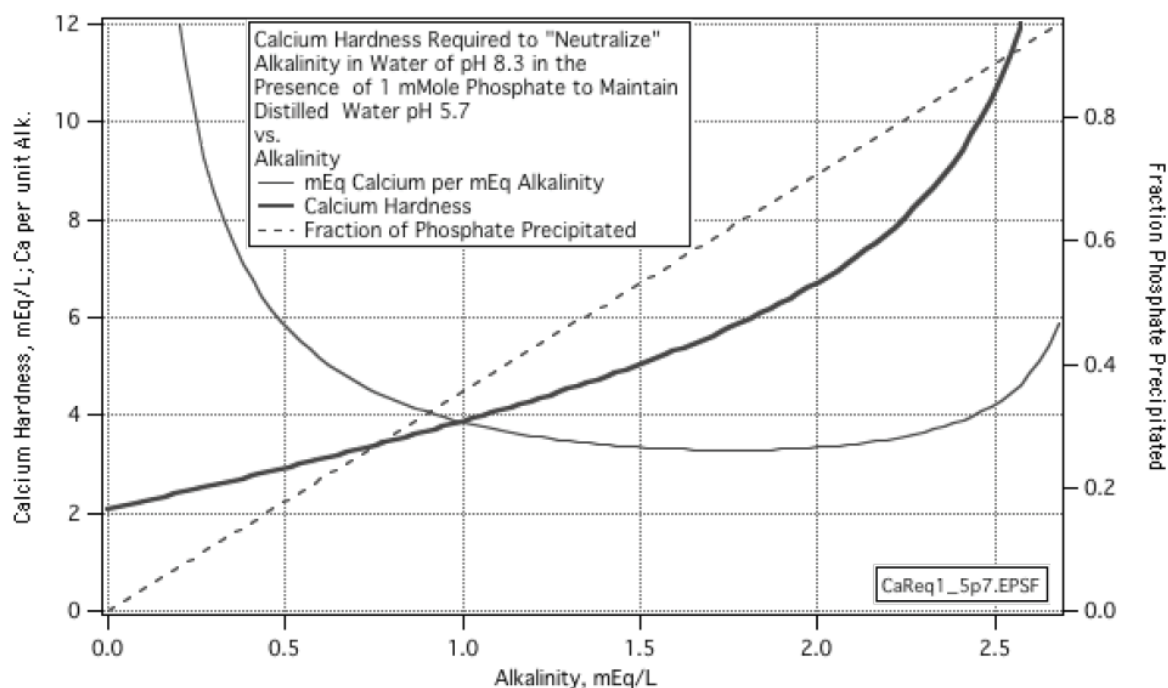


Gráfico 2: Cálcio necessário para manter o pH de água destilada do mosto (5,7) em um mosto com fosfato total de 1mMol/l em função da alcalinidade da mostura (pH 8,3) (de Lange, 2004).

Kolbach (1953) determinou que em mostos produzidos a partir de maltes base, 3,5 Eq de cálcio reagem com o fosfato provindo do malte, neutralizando 1 Eq da alcalinidade da água (o magnésio age de forma semelhante ao cálcio porém em menor grau). A alcalinidade que permanece após essas reações é denominada Alcalinidade Residual (RA - *Residual Alkalinity*), que eleva o pH da mostura para um valor maior que o da água destilada. Qualquer valor positivo de alcalinidade residual elevará o pH do mosto para valores acima dos encontrados em água destilada. Produtores de cerveja podem, através de sais de cálcio e magnésio, manipular o pH do mosto (Kolbach, 1953), ou utilizar a acidez natural de maltes escuros para reduzir a alcalinidade residual, ajustando o pH para o intervalo necessário segundo o estilo de cerveja desejado (Kaminski *et al.*, 2021)

A equação abaixo demonstra o comportamento da RA (Kaminski *et al.*, 2021):

$$RA \text{ (ppm em CaCO}_3\text{)} = \text{Alcalinidade (ppm em CaCO}_3\text{)} - [(Ca^{2+}(\text{ppm})/1,4) + (Mg^{2+}(\text{ppm})/1,7)]$$

Equação 4

O conceito de Alcalinidade Residual é uma ferramenta muito boa para estimar o efeito da alcalinidade da água sobre o pH de mosturas produzidas com maltes base. A partir dele, é possível prever o efeito das adições de sais de cálcio e ácido, sendo que a modificação do valor de pH da mostura com alteração na alcalinidade residual é alterada de acordo com a proporção e granulação dos grãos utilizados, diminuindo conforme a proporção de água para malte aumenta (Kaminski *et al.*, 2021).

4.2.2.3. pH da Mostura e o Seu Efeito na Cerveja

O pH é o fator que está diretamente relacionado à maioria das reações geoquímicas e bioquímicas em águas subterrâneas, afetando diretamente a eficiência das reações que ocorrem ao longo da produção de uma cerveja (Kresic, 2006). O controle do pH ao longo da produção da bebida é realizado durante a etapa de mosturação. Escolhido o estilo da cerveja, sua composição característica controlará a variação do pH (Stewart *et al.*, 2017).

O pH deve ser mantido entre 5,0 e 5,5 por conta das enzimas a serem ativadas (por exemplo a α -amylase, β -amylase e enzimas proteicas, que atuam respectivamente nos intervalos 5,3 a 5,6, 5,4 a 5,7 e 4,2 a 5,0). Esse intervalo pode ser atingido mais facilmente mantendo uma baixa alcalinidade (conteúdo de carbonato), mas deve-se levar em consideração que cerca de 50% a 60% do conteúdo de íons Ca^{2+} será perdido na lama e no conteúdo a ser descartado (Stewart *et al.*, 2017). O comportamento do pH varia de acordo com o carbonato, como pode ser observado na Tabela 3:

Tabela 3: O efeito da composição mineral da água do mosto no pH da mosturação (O'Rourke, 2002).

Composição da água	pH do mosto	
	Antes da fervura	Depois da fervura
50 ppm Ca^{2+}	5,5	5,4
50 ppm Ca^{2+} & 100 ppm CO_3^{2-}	5,8	5,6
350 ppm Ca^{2+}	5,1	5,0
350 ppm Ca^{2+} & 100 ppm CO_3^{2-}	5,4	5,3

Em uma mostura produzida apenas com maltes base, o mecanismo que atua como primário na redução do pH é o fosfato de cálcio, no entanto, o nível de

tosta de um malte também influencia diretamente no pH do mosto produzido a partir dele. Os maltes são divididos em quatro grupos dependendo do nível de torra pelo qual ele passa durante o seu processo de moagem, sendo classificados em: base; tostado; caramelo; e torrado (Kaminski *et al.*, 2021). A tabela 4 demonstra que há um comportamento decrescente dos valores de pH conforme o nível de tosta do malte, mas que, em valores acima de 198 SRM, há uma inversão do comportamento do pH da mostura.

Tabela 4: Alterações no pH de mostura-padrão em função do tipo de malte (¹Coghe *et al.*, 2004; ²Coghe *et al.*, 2005).

Nome do malte	Tipo do malte	Cor do mosto em SRM	pH da mostura padrão
Pilsen ¹	Base	2	5,96
Pilsen ²	Base	4,5	5,79
Melanoidina ¹	Tostado	28	5,50
Melanoidina ²	Tostado	31	5,32
Cara – Aroma ¹	Caramelo	228	5,08
Cara – Aroma ²	Caramelo	198	4,93
Carafa ¹	Torrado	558	5,18
Carafa ²	Torrado	450	5,10

O pH tem grande influência no resultado de uma cerveja, pois afeta a eficiência das reações, a solubilidade e a carga eletrostática de muitas moléculas. A regulação dos valores de pH também atua como medida protetiva de uma cerveja, já que poucas bactérias são capazes de sobreviver em ambientes ácidos, reduzindo assim o número de contaminantes em uma cerveja. Os principais impactos do pH nas características de uma cerveja são (O'Rourke, 2002):

- Físicos – A solubilidade de íons de sais minerais é afetada pelo pH de uma solução, principalmente se algum dos íons for moderadamente ácido ou básico. No geral, a solubilidade de sais pouco solúveis, por conter ânions básicos, aumenta conforme o pH é reduzido. Macromoléculas biológicas se comportam como ácidos e bases por meio de trocas catiônicas, sendo que as variações de pH envolvendo as macromoléculas determinarão quais delas trocarão prótons, estipulando as propriedades da molécula.
- Químicos – São poucas as reações não enzimáticas que ocorrem durante a brassagem. A principal alteração é o aumento da cor pela reação de Maillard (reação responsável pelo escurecimento de alimentos) durante a

fervura, favorecida a pHs baixos. A casca do malte contém polifenóis que são mais facilmente em ambientes alcalinos ($\text{pH} > 7,0$), responsáveis pela estabilidade coloidal (observada com a turvação da cerveja ao longo do tempo), além de adstringência na cerveja. Na cerveja, oxalatos de pH produzidos a partir do malte formam sais insolúveis com íons de cálcio, que precipitam como oxalato de cálcio reduzindo a tendência para a turvação e a depositar lama residual.

- Enzimáticos – a maioria das reações ocorridas durante a brassagem são catalisadas por enzimas (as quais atuam somente dentro de certas faixas definidas de pH) que são alimentadas pelas leveduras, seres vivos capazes de regular seu próprio pH para aproximadamente 6,5 (costumam viver em ambientes ácidos a neutros a partir de pH 2). Os principais procedimentos que dependem de reações enzimáticas eficientes afetadas pelo pH do mosto são:
 - Atividade proteolítica e amilolítica das enzimas – o que melhora o extrato da cerveja;
 - Otimização da fermentação do mosto;
 - Incremento do amido livre e do nitrogênio solúvel;
 - Aumento da taxa de fluxo da mosturação.

4.2.2.4. Íons

A seguir, são apresentados alguns dos íons mais relevantes na produção de cervejas e seu comportamento em águas subterrâneas (Kresic, 2006; Rosa & Afonso, 2015; Stewart *et al.*, 2017; Maltman, 2019; Kaminski *et al.*, 2021):

4.2.2.4.1. Cálcio

Entre os metais alcalinos terrosos mais abundantes na Terra, este possui apenas um estado de oxidação (Ca^{2+}) e está presente em grande parte das águas

naturais. Sua presença em sistemas aquosos ocorre pela solubilização de sólidos contendo cálcio e ele é controlado pelo equilíbrio entre as fases sólida e gasosa do CO₂, que por sua vez reage com a água formando ácido carbônico, gerando uma acidez que acelera a dissolução do cálcio presente nos minerais. Rochas sedimentares carbonáticas, como calcário e dolomita, são rochas ricas em cálcio; e minerais, como calcita e aragonita (CaCO₃), dolomita (CaMg(CO₃)₂) e gipsita (CaSO₄ · 2H₂O), são as principais fontes de cálcio na água. As equações de 5 a 7 expressam as reações entre o carbonato de cálcio e o CO₂ em sistemas hidráulicos:



O cálcio é um elemento importante para se obter uma cerveja estável e de bom paladar, além de ser vital para o controle do pH, visto que a sua reação com o fosfato do malte é um dos principais mecanismos de ajuste do pH do mosto. Em geral, o cálcio precipita o oxalato (como CaC₂O₄), evitando a posterior turvação da bebida, além de estimular o metabolismo e a floculação da levedura. Os íons de Ca²⁺ são essencialmente de sabor neutro na cerveja, somente reduzindo um pouco o amargor do lúpulo. O cálcio precisa se manter em quantidades elevadas ao longo dos processos de fervura e fermentação, sendo necessário uma alta quantidade na água (entre 50 e 200ppm).

4.2.2.4.2. *Magnésio*

O magnésio é um metal alcalino terroso comum e possui apenas um estado de oxidação significativo na química de águas (Mg²⁺). Sua ocorrência se dá principalmente em rochas sedimentares, como calcários e dolomitos, na forma de MgCO₃ (magnesita) e CaCO₃ X MgCO₃ (dolomita), e solubiliza de forma semelhante à do cálcio sob a influência de CO₂ dissolvido em águas subterrâneas. A concentração de magnésio tende a aumentar ao longo do caminho percorrido pela água subterrânea, conforme o precipitado formado se torna quase pura calcita. Portanto, águas mais maduras em terrenos sedimentares tendem a possuir um

maior índice Mg:Ca, já que condições para uma precipitação direta da dolomita em solução não são comumente encontradas em águas naturais.

No geral, a quantidade de cálcio é maior do que a de magnésio, provavelmente pela menor abundância de magnésio disponível nas rochas – à exceção dos aquíferos em rochas ricas em magnésio, como olivina-basaltos, serpentinitos e rochas dolomíticas. Quanto ao seu papel na cerveja, o metal age de forma semelhante ao cálcio, mas com menor intensidade, atuando também como um nutriente para as leveduras em uma concentração acima de 5ppm. Os íons de Mg^{2+} contribuem com sabores amargos e azedos quando acima de 86ppm, não devendo exceder 400ppm.

4.2.2.4.3. Sódio

Metal alcalino extremamente abundante em águas oceânicas, tende a se manter persistentemente em solução quando liberado de minerais silicáticos, pois não há reações de precipitação importantes aptas a manter o sódio em baixas concentrações na água. O sódio pode ficar retido na superfície de minerais argilosos por adsorção, mas a interação entre uma superfície e o sódio é muito menor do que a interação com íons divalentes como o cálcio. Reações catiônicas tendem a extrair íons divalentes da solução e repor por íons monovalentes como o sódio.

Quanto às fontes de sódio para a cerveja, as leveduras liberam Na^+ constantemente para o sistema, com o intuito de garantir um nível baixo de sódio em suas células, tendo em vista que são incapazes de acumular Na^+ . Ao adicionar alcalinidade à água cervejeira, quase sempre se adiciona sódio ao sistema na forma de bicarbonato de sódio ou de hidróxido de sódio. Em concentrações de 150 a 200 ppm, esse íon confere sabor salgado à cerveja, especialmente na forma NaCl, mas em concentrações inferiores a 100ppm atribui paladar doce a ela. Concentrações abaixo de 150ppm, proporcionam uma sensação mais encorpada em cervejas claras.

4.2.2.4.4. Cloreto

No geral, o cloreto presente em águas subterrâneas pode ser oriundo de quatro fontes naturais principais: (1) cloreto presente em sedimentos de águas marinhas antigas; (2) dissolução de halita e minerais relacionados a evaporitos; (3) concentração por evaporação de cloreto contribuído pela chuva ou neve; e (4) precipitação seca da atmosfera, particularmente em regiões áridas. Uma vez dissolvido em água, o cloreto se mantém em solução. Reações catiônicas com Cl^- só acontecem quando este ocorre em altíssimas concentrações. Esse íon não forma sais de baixa solubilidade, além de não ser adsorvido significativamente pela superfície de minerais.

O íon cloreto é regularmente adicionado à água e à cerveja na forma de CaCl_2 ou NaCl . Os cloretos de cálcio e magnésio não são prejudiciais à cerveja e conferem a ela um paladar encorpado (denso), além de clarificar a cerveja e intensificar seu dulçor. É extremamente importante para balancear o sulfato: com o aumento da proporção $\text{Cl}^-:\text{SO}_4^{2-}$, há um incremento no corpo e dulçor e uma redução de seco, amargo; em contrapartida, com o aumento do sulfato ocorre o efeito oposto. Ademais, teores de cloreto acima de 100ppm favorecem a corrosão dos equipamentos da linha de produção; acima de 300ppm atrapalham a clarificação da cerveja; e, quando acima de 500ppm, a taxa de fermentação é altamente afetada. A concentração recomendável de cloreto é aproximadamente 200ppm.

4.2.2.4.5. Sulfato

O íon sulfato (SO_4^{2-}) é uma forma oxidada do enxofre, produzida primariamente quando minerais sulfetados entram em contato com água aerada, sendo a pirita a maior fonte de sulfato e ferro em águas subterrâneas. É encontrado como sulfetos metálicos em rochas ígneas, minerais do grupo dos feldspatóides, mas sua principal ocorrência é em rochas sedimentares evaporíticas, que são extremamente solúveis em água, sendo o sulfato de cálcio (gipsita ou anidrita) a principal forma do sulfato a compor a maioria dessas sequências sedimentares. O conteúdo padrão de sulfato em águas subterrâneas em rochas ígneas e rochas sedimentares se encontram, geralmente, abaixo de 30ppm, apenas em depósitos de gipsita e anidrita pode se alcançar o ponto de saturação do sulfato de cálcio, aproximadamente 1360ppm.

O sulfato é um íon característico da água de Burton upon Trent essencial para a síntese de aminoácidos da levedura que contém enxofre, além de afetar positivamente na degradação de proteínas e amidos, favorecendo a filtração do mosto e remoção de sedimentos. A sua principal influência no sabor é o controle do amargor e atribuição de um paladar seco e denso à cerveja finalizada – além de acentuar o sabor e aroma do lúpulo – quando em quantidades moderadas, em um intervalo entre 200 a 400 ppm. Se o teor de sulfato for muito elevado a eficácia do lúpulo é prejudicada (dificultando a extração de amargor) e ela passa a possuir um paladar amargo e salgado, além de possuir propriedades laxativas. A forma mais comum de adicionar sulfato é através da gipsita na forma de gesso ou sulfato de cálcio hidratado.

4.2.2.4.6. Carbonato e Bicarbonato

Os íons de bicarbonato (HCO_3^-) e carbonato CO_3^{2-} em águas subterrâneas são advindos da atmosfera, do CO presente no solo e da dissolução de rochas compostas por carbonato de cálcio. Uma quantidade limitada de calcário será dissolvida na água, dissociando-se em íons Ca^{2+} e CO_3^{2-} . Uma pequena quantidade de CO_3^{2-} é dissolvida e libera prótons, que por sua vez reagem com CO_3^{2-} formando o bicarbonato (HCO_3^-), resultando em um maior dissolvimento do calcário para repor os íons de CO_3^{2-} que se ligam aos prótons para formar mais bicarbonato (Figura 4) (de Lange, 2004).

Em um cenário de equilíbrio, o pH da água indica o fracionamento de diferentes espécies de carbonato, visto que íons bicarbonato são predominantes em pH de 6 a 8,5, e a dissociação de bicarbonato em carbonato se inicia em um pH de aproximadamente 8,35, sendo que o carbonato domina somente em águas altamente alcalinas. Se o pH for menor que 5, a solução possui somente Ácido Carbônico. Em situações reais, a pressão parcial de CO_2 e a resultante de equilíbrio $\text{CO}_2/\text{CaCO}_3$ são os principais fatores que afetam o pH da maioria das águas potáveis.

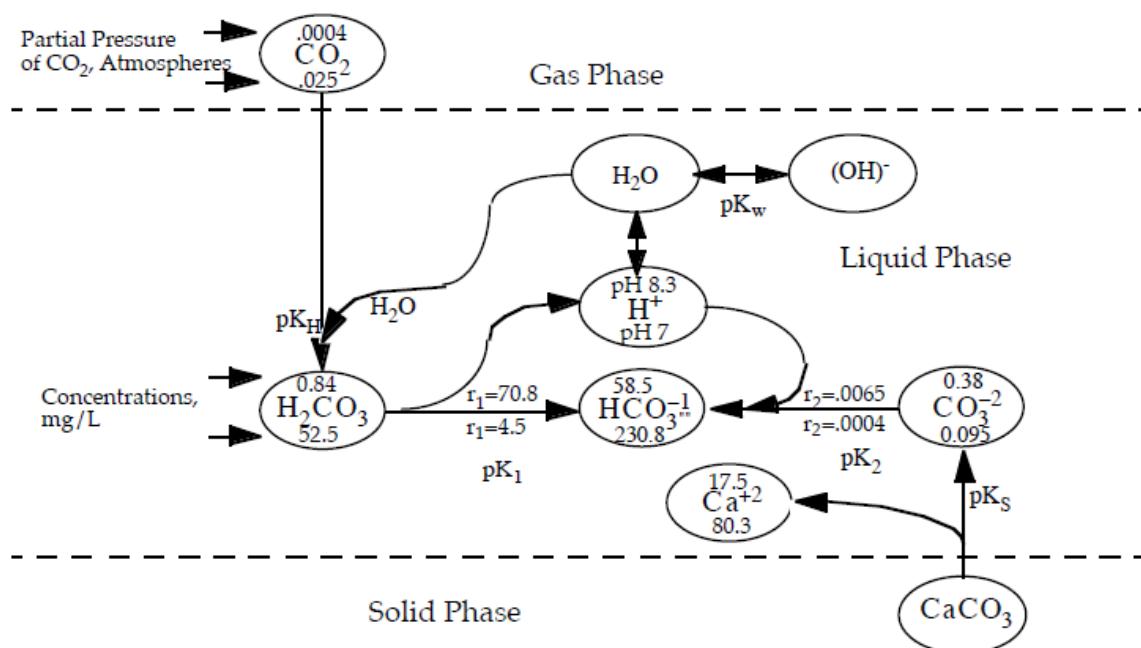


Figura 30: Diagrama ilustrativo das duas fontes mais comuns de espécies de carbonato na água – CO_2 do ar e calcário dissolvidos de rochas. A espécie dióxido de carbono aquoso/ácido carbônico prevalece em pH baixo, a espécie bicarbonato em pH de 6 a 10, e a espécie carbonato em pH alto. Somente uma pequena fração de CO_2 aquoso realmente forma ácido carbônico – a razão de equilíbrio é normalmente 1/650, dependendo da pressão parcial do gás e do pH (de Lange, 2004).

4.2.3. Tratamentos de água cervejeira para cervejaria

A água utilizada na fabricação de cervejas precisa ser potável e livre de contaminantes. De acordo com Kaminski *et al.* (2021), atualmente, os problemas mais comuns são oriundos de contaminações químicas/industriais ou por subproduto da desinfecção da água, sendo necessário reconhecer os contaminantes e removê-los através dos métodos a seguir, ordenados conforme a sequência em que são aplicáveis durante o tratamento padrão de águas (remoção de sólidos em suspensão, remoção de sólidos dissolvidos e remoção de contaminantes gasosos). Para os autores, as remoções consistem em:

4.2.3.1. Remoção de sólidos em suspensão: filtração mecânica

Tratamento realizado através da filtração de partículas por meio de um filtro adequado ao tamanho dos resíduos, ele é feito normalmente de um meio granular, fibras de polímeros ou outros tipos substituíveis ou recarregáveis. Os filtros em: padrão ou absoluto, aquele reterá 99% das partículas em sua faixa de tamanho de uso e o segundo não permitirá que nenhuma partícula passe além da sua capacidade, tendo como fator a temperatura, quando muito elevadas podem acarretar na quebra prematura do filtrante.

4.2.3.2. Remoção de sólidos dissolvidos: ferro e Manganês

Até mesmo em baixas concentrações o ferro e o manganês são prejudiciais tanto à cerveja quanto aos sistemas de caldeiras e trocadores de calor, sendo necessário removê-los ao máximo. Os autores propõem como forma de remover o ferro, a adição de ácido fosfórico para formar fosfato de ferro (FePO_4), a ligação do ferro com o fósforo é fraca, pode ser rompida facilmente pela luz ou calor, mas é um composto insolúvel que precipita em um dia, sendo facilmente removido. Já para a remoção do manganês utiliza-se filtração com glauconita, mineral capaz de remover também ferro e sulfeto de hidrogênio.

4.2.3.3. Remoção de sólidos dissolvidos: troca iônica

Os sistemas de troca iônica utilizam esferas de polímero – permeáveis e com alta área superficial para que ocorra a troca – fabricadas para conter sítios de troca catiônica ou aniônica dentro de sua estrutura. Esses sistemas são vantajosos pela sua alta taxa de fluxo, a água flui através do meio e pelas esferas de resina para que os íons indesejáveis sejam trocados pelos presentes na superfície, e ligando-se a elas. Existem quatro tipos de resinas de troca iônica, a catiônica de ácido fraco, catiônica de ácido forte, aniônica de base fraca e aniônica de base forte:

4.2.3.3.1. Resina catiônica de ácido fraco (WAC): abrandamento comum da água

A resina possui elementos em sua superfície q serão substituídos pelos íons metálicos presentes na água, e seu modo de atuação ocorre através da substituição de todos os íons metálicos bivalentes presentes na água por íons Na^+ ou H^+ . Possui ótima capacidade para remover todos os íons metálicos divalentes, incluindo os cátions responsáveis pela dureza (Ca^{2+} e Mg^{2+}) e os indesejáveis como Fe^{2+} e Mn^{2+} , removendo a dureza temporária, mas não a permanente. Comumente utilizadas para o tratamento de águas salobras por atuar somente em condições alcalinas.

4.2.3.3.2. Resina catiônica de ácido forte (SAC): abrandamento completo da água

Atua de forma semelhante ao WAC removendo os mesmos íons, mas sua principal vantagem é o fato de operar em toda a faixa de pH (0 a 14). O SAC e o WAC não devem ser utilizados para o tratamento da água cervejeira, sendo ideais para o uso de águas de altíssima pureza, como as utilizadas para alimentação de caldeiras.

4.2.3.3.3. Resina aniônica de base fraca (WBA): tratamento de alcalinidade

Utilizada para a redução da alcalinidade, sendo essa a busca da maioria dos cervejeiros, alé de ser um método que remove a sílica, responsável por gerar problemas nos sistemas de caldeiras e trocadores de calor. A resina WBA remove os ânions de ácidos fortes (Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^-), a resina WBA ré utilizada para remover os ânions de ácidos fortes (Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^-).

4.2.3.3.4. Resina aniônica de base forte (SBA): tratamento de alcalinidade

Este tipo de sistema remove ânions de ácidos fortes e fracos incluindo carbonatos, silicatos e nitratos através da troca por hidróxido ou, em alguns casos,

por cloreto. Sua taxa de substituição é tão alta que através deste método, é possível produzir águas com concentrações iônicas menores que 0,01 ppm.

4.2.3.4. Remoção de sólidos dissolvidos: tecnologias de membrana

Microfiltração, ultrafiltração, nanofiltração e osmose reversa são todas chamadas coletivamente de tecnologias de membrana, pois utilizam uma película fina para atuar como filtro para sólidos dissolvidos. Os métodos citados têm como diâmetro máximo da área permeável, respectivamente: 0,1 μm , 0,01 μm , 0,001 μm , e 0,0001 μm , sendo a última capaz de filtrar a maioria dos cátions e ânions dissolvidos por meio de uma membrana semipermeável, de uma região de baixa concentração de soluto para uma região de alta concentração.

4.2.3.5. Remoção de contaminantes orgânicos: carvão ativado

A contaminação biológica é a principal preocupação de qualquer empresa de abastecimento de água, esses contaminantes podem ser bactérias outros organismos, sendo a desinfecção residual por cloro necessária para manter a água descontaminada depois de sair da estação de tratamento. Em cervejarias, a fim de evitar sabores indesejados, os desinfetantes precisam ser removidos e o Carvão Ativado Granular (CAG) é o método mais comum para se remover o cloro e a maioria dos contaminantes orgânicos. O carvão ativado é obtido a partir uma fonte de carbono (normalmente madeira, casca de coco, cascas de nozes, carvão etc.) e convertendo em carvão, através de calor ou produtos químicos (oxidação) e calor.

4.2.3.6. Remoção de gases dissolvidos: desaeração

O oxigênio é definitivamente a ruína de uma cerveja, teores acima de 0,05ppm são prejudiciais à cerveja finalizada, geralmente sendo mantidos teores abaixo de 0,03ppm. A técnica originalmente utilizada envolve a desaeração a vácuo transformando a água em névoa em uma câmara parcialmente evacuada, mas outros modos de remover o oxigênio é através de tecnologias de membrana, que também remove outros gases, e por um sistema de desaeração por colunas (método mais utilizada na indústria cervejeira).

5. CONCLUSÕES

Poucas cervejarias possuem estrutura e capital para que haja um abastecimento constante de água mineral controlada. De maneira geral, a grande maioria das fábricas localizadas na região metropolitana de São Paulo utilizam a rede de abastecimento público e o único tratamento empregado é por meio da filtração para remoção do cloro. As cervejarias regulamentadas possuem análises de potabilidade da água utilizada, entretanto, no geral, somente fábricas maiores possuem um controle rígido da sua composição.

A água não é o principal fator na determinação das características de uma cerveja, porém desempenha papel vital no rendimento e interação das outras matérias primas, além de realçar algumas características sensoriais da bebida. Sabe-se, por exemplo, que desde a metade do século XVIII o cálcio na água é manipulado para que a cerveja tivesse características equilibradas, como é o caso de Burton upon Trent. Neste sentido, a composição química da água é o que torna única a cerveja de uma determinada região, visto que, apesar de não determinar, influencia nas características físicas e no sabor dela. Os íons de cálcio e magnésio são os principais responsáveis pelo equilíbrio da bebida, e a proporção de sódio e cloreto controlam o nível de doce e salgado.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Arnam, A. H.; Sutherland, J. P. 1997. *Bebidas: Tecnologia, Química e Microbiologia*. Zaragoza, Editorial Acribia S.A., 487 p. (Série Alimentos Básicos 2)

Baccan, N.; Andrade, J. C. de; Godinho, O. E. S.; Barone J. S. *Química analítica quantitativa elementar*. São Paulo: Edgard Blucher, 2004.

Boyd, C. E., Tucker, C. S., & Somridhivej, B. (2016). *Alkalinity and hardness: critical but elusive concepts in aquaculture*. IN: Journal of the World Aquaculture Society, 47(1), 6-41.

Coghe, S., Adriaenssens, B., Leonard, S., & Delvaux, F. R. (2004). *Fractionation of colored Maillard reaction products from dark specialty malts*. IN: Journal of the American Society of Brewing Chemists, 62(2), 79-86.

Coghe, S., D'Hollander, H., Verachtert, H., & Delvaux, F. R. (2005). *Impact of dark specialty malts on extract composition and wort fermentation*. IN: Journal of the Institute of Brewing, 111(1), 51-60.

- D'Avila, R. F., de Mello Luvielmo, M., Mendonça, C. R. B., & Jantzen, M. M. (2012). *Adjuntos utilizados para produção de cerveja: características e aplicações*. IN: Estudos Tecnológicos em Engenharia, 8(2), 60-68.
- De Lange, A. J. (2004). *Alkalinity, Hardness, Residual Alkalinity and Malt Phosphate: Factors in the Establishment of Mash pH*. IN: Cerevisia, 29, 188-198.
- de Mello, D. R. (2005). *Resolução de Diretoria Colegiada - RDC Nº. 274, de 22 de Setembro de 2005*.
- de Oliveira, N. A. M. (2011). *Leveduras utilizadas no processo de fabricação da cerveja*.
- de Paula Santos, S. (2003). *Os primórdios da cerveja no Brasil*. Ateliê Editorial
- Durello, R. S., Silva, L. M., & Bogusz, S. (2019). *Química do lúpulo*. Química Nova, 42, 900-919.
- Guedes, T. A., Martins, A. B. T., Acorsi, C. R. L. & Janeiro, V. (2005) *Estatística descritiva*. Projeto de ensino aprender fazendo estatística: 1–49.
- Hieronymous, S. *Lúpulo: guia prático para o aroma, amargor e cultivo de lúpulos*. 1. Ed. Porto Alegre, RS: Editora Krater, 2020. (Coleção Brewing Elements).
- Kaminski, Colin & John, Palmer (2021). *Water: A comprehensive guide for brewers*. IN: *Brewing Elements Series*. Brewers Publications.
- Kolbach, P. (1953). *Der Einfluss des Brauwasser auf das pH von Würze und Bier*. Monatschrift für Brauerei, 6(5), 49-52.
- Kresic, N. (2006). *Hydrogeology and groundwater modeling*. CRC Press.
- Mallett J. *Malte: um guia prático do campo à cervejaria*. 1. Ed. Porto Alegre, RS: Editora Krater, 2021. (Coleção Brewing Elements)
- Maltman, A. (2019). *The role of geology in the fall and rise of local brewing*. MercianGeologist **19**: 266.
- MAPA. Anuário da cerveja 2020. Disponível em: <<http://www.cervbrasil.org.br/novosite/wp-content/uploads/2022/07/anuariocerveja2.pdf>>. Acesso em: 28 de jul. 2022.
- Mega, J. F., Neves, E. & Andrade, C. J. de (2011). *A produção de cerveja no Brasil*. Revista Citino **1**: 34–42.
- Mendonça, J. K. A., & Flores, J. S. (2017). *Desenvolvimento de uma metodologia simples para determinação da dureza da água*. Scientia Tec, 4(1), 133-142.
- Morais, J. S. (2015). *O Lúpulo: Cultivares e extrato*. Livro De Actas: 11–21.

O'Rourke, T. (2002). The role of pH in brewing. *Brewer International*, 2(8).

Porto, P. de D. (2011). *Tecnologia de fabricação de malte: uma revisão*.

Rebello, F. D. F. P. (2009). *Produção de cerveja*. Revista Agrogeoambiental **1**.

Rosa, N. A. & Afonso, J. C. (2015). *A química da cerveja*. Revista Química Nova. São Paulo **37**: 98–105.

Salimbeni, J., Manegueti, M. & Rolim, T. F. (2016). *Caracterização da água e sua influência sensorial para a produção de cerveja artesanal*.

Stewart, G. G., Russell, I. & Anstruther, A. (2017). *Handbook of brewing*. CRC Press.

Villas Boas Mello, J. A. & Nogueira da Silva, J. L. (2020). *Requisitos de produto para um projeto de cerveja artesanal*. Innovar **30**: 39–52.

White, C. & Zainasheff, J. *Levedura: guia prático para a fermentação da cerveja*. 1. Ed. Porto Alegre, RS: Editora Krater, 2020 (Coleção Brewing Elements).

<https://www.nbcarchives.co.uk/explore-the-collections/burton-brewing-capital-of-the-world/>)

<https://www.clubedomalte.com.br/blog/homebrewing/conheca-quais-sao-os-tipos-de-malte/>