



Universidade de Uberaba

Programa Mestrado em Engenharia Química

Dissertação de Mestrado

ATENUAÇÃO DO TEOR DE CÁLCIO DA ÁGUA DURA PARA CONSUMO
HUMANO

Autor: Helenice Saud Sallum

Orientador: Prof. Dr. José Roberto Delalíbera Finzer

Uberaba

2025

Helenice Saud Sallum

ATENUAÇÃO DO TEOR DE CÁLCIO DA ÁGUA DURA PARA CONSUMO
HUMANO

Dissertação apresentada ao
Programa Mestrado em Engenharia Química,
da Universidade de Uberaba, como requisito
para a obtenção do título de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. José Roberto
Delalíbera Finzer

Uberaba

2025

Catálogo elaborado pelo Setor de Referência da Biblioteca Central UNIUBE

- S34a Sallum, Helenice Saud.
Atenuação do teor de cálcio da água dura para consumo humano /
Helenice Saud Sallum. – Uberaba (MG), 2025.
30 f. : il., color.
- Dissertação (Mestrado) – Universidade de Uberaba. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. Mestrado Profissional. Área: Desenvolvimento de Processos Químicos Agroindustriais.
Orientador: Prof. Dr. José Roberto Delalibera Finzer.
1. Processos químicos. 2. Reações químicas. 3. Cálcio. 4. Precipitação (Química). I. Finzer, José Roberto Delalibera. II. Universidade de Uberaba. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. Mestrado Profissional. III. Título.
- CDD 541.39

Tatiane da Silva Viana – Bibliotecária – CRB-6/3171

HELENICE SAUD SALLUM

ATENUAÇÃO DO TEOR DE CÁLCIO DA ÁGUA DURA PARA CONSUMO HUMANO

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Química do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química - Mestrado Profissional da Universidade de Uberaba (PPGEQ-MP/UNIUBE).

Área de Concentração: Desenvolvimento de Processos Químicos Agroindustriais

Aprovado em: 30/10/2025

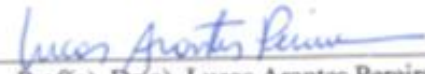
BANCA EXAMINADORA:



Prof(a). Dr(a). José Roberto Delalibera Finzer – Orientador(a)
Universidade de Uberaba



Prof(a). Dr(a). Ana Paula Silva Capucci
Universidade de Uberaba



Prof(a). Dr(a). Lucas Arantes Pereira
IFTM- Instituto Federal do Triângulo Mineiro

Dedico esse trabalho ao meu filho Dr
Rodolfo Saud Sallum Santana

AGRADECIMENTO

Agradeço ao Criador pela dádiva da vida.

Agradeço imensamente à Dr^a Ana Paula Silva Capuci, que compartilhou de cada detalhe dessa pesquisa e contribuiu sobremaneira para que fosse concluída com êxito.

Àqueles que compartilharam esse período no Programa de Mestrado em Engenharia Química Universidade de Uberaba, Uniube; juntamente agradeço aos professores que fizeram essa conquista ainda mais grandiosa.

Agradeço à Companhia Operacional de Desenvolvimento, Saneamento e Ações Urbanas de Uberaba em nome da equipe da ETA que tem a árdua e nobre tarefa de manter a qualidade da água da cidade de Uberaba.

Agradeço em especial ao meu orientador, Prof. Dr. José Roberto Delalíbera Finzer, professor e pesquisador exemplar que não poupou esforços para me auxiliar nesse projeto. Muito obrigado, Professor, pela presteza e pela salutar contribuição que destes ao trabalho.

Agradeço a todos com os quais compartilho a existência, entendendo que fazemos parte de uma Família Universal onde caminhamos mutuamente rumo ao progresso moral e intelectual.

Aos órgãos de fomento: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo suporte dado ao desenvolvimento dessa dissertação (Processos: MPR-01119-16; APQ-01203-23).

“O homem não é nada além
daquilo que a educação faz dele .”

(Kant 1724-1804)

RESUMO

Tratamento de água para consumo humano tem como grande desafio à estabilidade do padrão de qualidade da água no sistema de abastecimento. Dentre os inúmeros processos para obtenção da qualidade da água para consumo humano, como a desinfecção para controle de microrganismos patogênicos, tem-se a preocupação com a alta concentração de metais como o de cálcio, presente em regiões cujo solo é constituído pela erosão de rochas calcáreas acarretando águas com a presença de cálcio, ultrapassando os limites prescritos pelos órgãos regulamentadores, que traz malefícios à saúde e acarreta limitações para utilização em vários segmentos. Além disso, a água dura, como é chamada quando tem a presença de alta concentração de cálcio, é um fenômeno recorrente que acarreta diversos contratempos para a comunidade e para as companhias de saneamento. Várias possibilidades técnicas para atenuar essa concentração através da precipitação do cálcio obtendo resultados satisfatórios foram aplicadas, uma delas foi a técnica de uso de um reator em escala reduzida para obter a água sem cálcio solúvel apreciado. O conteúdo de dióxido de carbono, CO_2 , em uma embalagem de 500 mL de água gaseificada comercial possibilita a conversão de 336 ppm de Ca^{++} em CaCO_3 (precipitação), experimento realizado neste estudo, após essa conversão filtra-se e obtém-se água com concentração de cálcio permitida. Esta etapa contempla a carbonatação. Dessa forma, as técnicas estudadas demonstram ser promissoras e sustentáveis uma vez que tem vantagens: técnica, econômica e ambiental.

Palavras-chave: Carbonatação, cálcio, precipitação.

ABSTRACT

The major challenge of treating water for human consumption is the stability of the water quality standard in the supply system. Among the numerous processes for obtaining water quality for human consumption, such as disinfection to control pathogenic microorganisms, there is concern about the high concentration of metals such as calcium, present in regions where soil is formed by the erosion of limestone rocks, resulting in water with calcium levels exceeding the limits prescribed by regulatory agencies, which is harmful to health and limits its use in various segments. In addition, hard water, as it is called when it has a high concentration of calcium, is a recurring phenomenon that causes several setbacks for the community and for sanitation companies. Several technical possibilities for attenuating this concentration through calcium precipitation have been applied, obtaining satisfactory results, one of which is the technique of using a small-scale reactor to obtain water without the soluble calcium that is appreciated. The CO₂ content in a 500 ml package of commercial carbonated water allows the conversion of 336 ppm of Ca⁺⁺ into CaCO₃ (precipitation). After this process, it is filtered and water with the permitted calcium concentration is obtained. This process includes carbonation. Thus, the techniques studied prove to be promising and sustainable since they have technical, economic and environmental advantages.

Keywords: Carbonation, calcium, precipitation

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Tratamento Convencional de água ((FRANCISCO et al., 2011).....	1
Figura 1.2 - Tubulação com incrustações.....	3
Figura 1.3 - Torneira com incrustações	3
Figura 3.1 – ph de soluções saturadas de CO ₂ – H ₂ O em função da pressão	5
Figura 3.2 – Esquema de um processo químico para promover abarandamento de água dura.....	6
Figura 3.3 – Solubilidade de CO ₂ em H ₂ O em água em função da temperatura	7
Figura 3.4- Formação de cálculos renais pelo excesso de Ca ⁺⁺	8
Figura 3.5- Tubulação com incrustações pelo depósito de Ca ⁺⁺	9
Figura 3.6 – Solubilidade de CaCO ₃ em água quente e fria dados empíricos baseados em tempo de reação de 60 a 90 minutos seguidos de sedimentação.....	11
Figura 4.1- Esquema do equipamento Jar Test	13
Figura 4.2 – Dimensões e relações geométrias dos jarros do Jar test.....	15
Figura 4.3 - Número de potência do equipamento utilizado.....	15
Figura 4.4 – Gradeiente de velocidade em função da rotação.....	16
Figura 4.5 - pHmetro	17
Figura 5.1- Reator para carbonatação de água.....	18

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1- Concentração de sais de cálcio e magnésio em água dura no tratamento com CO_2	19
Tabela 5.2 – Solubilidade de CO_2 em solução saturada na pressão atmosférica de Uberaba MG 98,8 kPa.....	21
Tabela 5.3 – Resultado da reação entre o ácido carbônico (H_2CO_2) com $\text{Ca}(\text{OH})_2$	22
Tabela 5.4- Resultados da reação de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ com H_2CO_2	23

LISTA DE ABREVEATURAS

Ca - Cálcio

CO₂ – Gás carbônico

H₂CO₂ –Ácido Carbônico

Ca(OH)₂- Hidróxido de Cálcio

CaCO₃-Carbonato de cálcio

Mg- Magnésio

H- hidrogênio

SO₄- íon sulfato

L- Litro

Ml – mililitro

mg – Miligrama

g – Grama

°K- Temperatura em Kelvin

°F – Temperatura em Farenheit

°C- Temperatura em Celsius

pH –Potencial hidrogeniônico

mPa –Unidade de pressão – mega Pascal

P - Pressão

kPa – Unidade de Pressão kilo Pascal

mol – quantidade de matéria representando o número de partículas em uma substância

Np - número de potência

ppm- parte por milhão

SUMÁRIO

1- INTRODUÇÃO	1
2- OBJETIVOS.....	4
3- CONCEITOS FUNDAMENTAIS	4
3.1 –Caracterização de soluções saturadas de CO ₂ em água	
3.2 – Abrandamento da água dura	
3.3- Solubilidade do dióxido de carbono em água	
3.4 – Consequências de Ca ⁺⁺ para saúde e indústria	
4- MATERIAL E MÉTODOS	11
4.1- Agitador para flocculação Jar Test	
4.2 –Gradiente de velocidade	
4.3 – Estudo de caso carbonatação usada para atenuar o cálcio	
5- RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	17
5.1 – Ensaio preliminar	
5.2 – Estudo de caso carbonatação de água usada para atenuação do cálcio	
5.3 – Potência consumida e gradiente de velocidade	
5.4- Reação de neutralização do hidróxido de cálcio	
5.5 - Reação de gás carbônico com hidróxido de cálcio em Jar Test	
6- TRABALHOS FUTUROS.....	24
7- CONCLUSÕES.....	25
REFERÊNCIAS.....	26

1 INTRODUÇÃO

O tratamento convencional de água para consumo humano, no geral, é constituído basicamente das seguintes etapas: coagulação, floculação, decantação, filtração, desinfecção e fluoretação. As etapas de coagulação, floculação e decantação constituem a clarificação, que objetiva primordialmente a remoção de sólidos suspensos e parcela dos sólidos dissolvidos. A filtração objetiva a remoção dos sólidos remanescentes, incluindo microrganismos. Por fim, a desinfecção visa inativar os microrganismos ainda presentes, enquanto a fluoretação visa a prevenção da cárie dentária, ver a Figura 1.1 (FRANCISCO et al., 2011).



Figura 1.1. Tratamento Convencional de água ((FRANCISCO e POHLMANN, 2011).

O saneamento básico é um dos indicadores de análise que reflete a condição socioeconômica de um país haja vista que indicadores demonstram que há uma correlação entre investimento em saneamento e saúde pública. Saneamento básico abrange coleta e tratamento de água, esgoto e lixo além de limpeza urbana e drenagem da água pluvial. Com isso, percebe-se o quão relevante é para o bem-estar social a conscientização para a melhoria contínua do saneamento básico (FILHO, 2019).

As águas superficiais como de córregos, rios e açudes são captadas e bombeadas para as estações de tratamento de água onde recebem os tratamentos adequados que as caracterizam ao final do processo como água potável (FILHO, 2019).

A dureza da água é um dos problemas comuns de qualidade da água em todo o mundo. Um total de 70% da superfície terrestre é coberta por água. Deste total, 97,0% é água do mar, não potável, e apenas 2,5% é constituído por água doce, acessível para uso humano e destes, apenas 0,5% é utilizado como água potável. A água com alta concentração de cálcio é conhecida como água dura e é encontrada a uma taxa superior a 85%, contendo íons de magnésio e de cálcio das rochas e do solo, levando à água dura (AHN et al.2018).

Quanto maior a quantidade de íons cálcio, mais dura será considerada a água. Quando apresentar teores desses cátions acima de 150 mg/L, então a água é dura; se estiver abaixo de 75 mg/L, a água é mole; e se for entre 75 e 150 mg/L, a água é moderada (LEGNER, 2021).

A pesquisa para atenuar a alta concentração de cálcio para obter água para consumo humano, é um item importante no processo da obtenção de água potável. A concepção desta pesquisa se dá ao detectar que em muitas regiões do Brasil, o teor de cálcio na água é alto, o que torna inadequada ao consumo humano. Como exemplo de algumas regiões pode-se citar: Lagoa Santa, Sete Lagoas, Montes Claros, situadas no Estado de Minas Gerais bem como em outros Estados.

Normalmente as cidades que apresentam o problema de dureza na água estão localizadas em regiões de formação geológica em terrenos formados pela erosão de rochas calcárias. Dentre outros problemas, a dureza da água afeta a atividade cotidiana do lar, como limpeza pois diminui a eficiência dos detergentes e sabões provocando consumo excessivo.

A presença de cálcio na água potável, embora essencial em quantidades adequadas para a saúde humana, pode apresentar desafios quando em excesso.

A ingestão de água com excesso de cálcio mineral presente no solo de algumas regiões, se não for devidamente tratada, pode resultar à hipercalcemia, formação de oxalato de cálcio nas pessoas, as chamadas “pedra nos rins”, que são na verdade é a “aglomeração” deste oxalato.

Outro grande problema causado pela alta concentração deste elemento na água, é o depósito do mesmo nas paredes internas de tubulações, aquecedores de água, chuveiros, torneiras e outros aparelhos que entram em contato com a água em seus funcionamentos (ver as Figura 1.2 e 1.3). Além dos potenciais impactos na saúde, a água dura causa vários prejuízos em outros segmentos. O acúmulo de cálcio ao longo do tempo pode obstruir as tubulações, reduzir

o escoamento de água e diminuir a eficiência dos aparelhos. A redução da eficiência energética ocorre porque o calcário atua como isolante térmico dificultando a transferência de calor exigindo mais energia para aquecer a água (GRUPO HÍDRICA, 2024).



Figura 1.2 Tubulação com incrustação – excesso de cácio na água-www.blog.purific.com.br



Figura 1.3 Torneira com incrustação – excesso de cácio na água www.blog.purific.com.br

2 OBJETIVOS

O estudo atual tem como objetivo descrever e avaliar o processamento químico que atenua a concentração de cálcio nas águas duras, para obter a potabilização da mesma para consumo humano, haja vista o índice máximo permitido ser até 500 mg/L (PORTARIA MS nº 518/2004), usou-se gás carbônico para precipitação do cálcio em água para operações domésticas e industriais.

3 CONCEITOS FUNDAMENTAIS

3.1 Comportamento de soluções saturadas de CO₂ em água.

O ácido carbônico (H₂CO₃) é uma molécula que se encontra na interface entre a química orgânica e a inorgânica. De fato, segundo algumas definições, é uma molécula orgânica, enquanto, segundo outras, é uma molécula inorgânica (LOERTING; BERNARD, 2010).

No equilíbrio ácido-base, o ácido carbônico está em equilíbrio com o dióxido de carbono e a água, podendo ser resumido com a Equação (3.1):



Usando método espectroscópico, Haghi et. al (2017), efetuaram medições de pH em soluções saturadas de CO₂ em H₂O em temperaturas de 293,15 K, 323,15 K e 353 K, mostrado na Figura 3.1. Na mesma figura são relatados dados experimentais de medidas de pH: HAGHI et al., (2017).

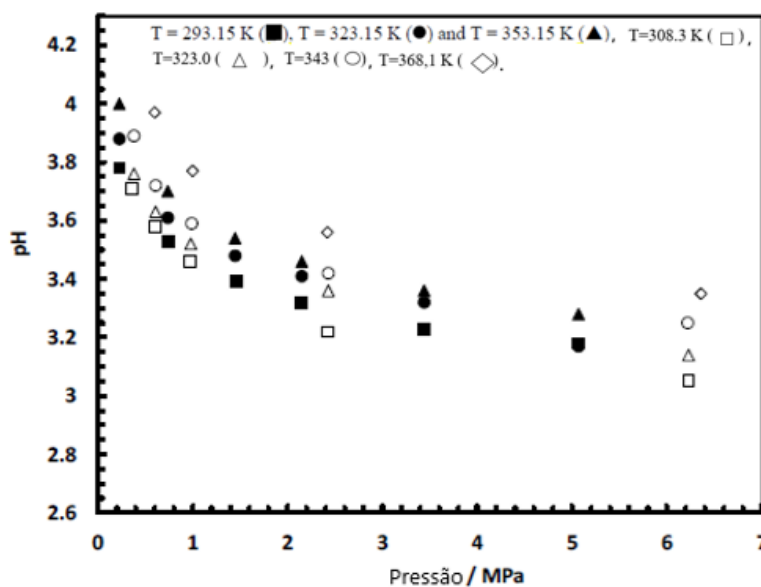


Figura 3.1: pH de soluções saturadas de CO₂ – H₂O em função da pressão. Símbolos fechados são resultados simulados e símbolos vazios são experimentais Fonte: HAGHI et al., 2017.

No geral, os resultados obtidos neste estudo (Haghi et al, 2017) pelo método espectroscópico, seguem uma tendência semelhante: queda rápida no valor de pH quando a pressão é inferior a 3 mPa e menores variações nos valores de pH a uma pressão superior a 3 mPa.

Analizou-se o comportamento da solução saturada de dióxido de carbono em água na pressão atmosférica de Uberaba é de 0,098 mPa, de acordo com a Figura 3.1 mostrou-se que o pH da solução ficou acima de 4, para temperatura variando de 293 a 368 K (entre 20°C e 95°C).

3.2 Abrandamento da água dura

3.2.1 Existem várias técnicas para abrandar a água dura contendo cálcio e magnésio, uma delas é a reação de hidróxido de sódio e carbonato de sódio (LEGNER,2021).

A Figura 3.2 consiste no esquema de um Processo Químico para promover o abrandamento de água.

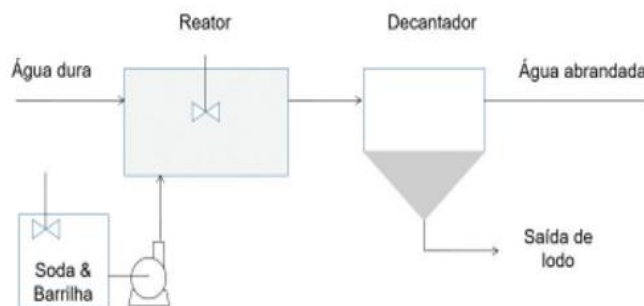
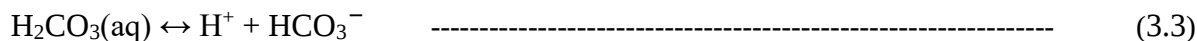
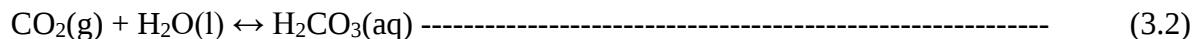


Figura 3.2: Processo químico abrandamento da água (TAE, 2021).

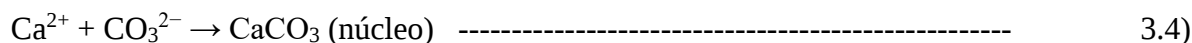
A injeção de hidróxido de sódio e carbonato de sódio em um reator com água ocasionará a precipitação de cálcio na forma de CaCO_3 (carbonato de cálcio). Após a precipitação no reator, o carbonato de cálcio sedimenta no decantador e a água já sai abrandada, separada no topo do decantador.

3.2.2 Utilização de CO_2 para reduzir a dureza da água.

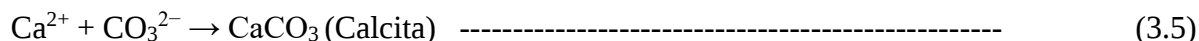
Quando o CO_2 se dissolve na água, reage com ela para formar ácido carbônico, o qual se dissocia em íons de hidrogênio e no íon de bicarbonato, segundo as reações (AHN et al., 2018; NIPPON GASES, 2018).



Formação de núcleo ou cluster artificial quando a solução se encontra saturada.



O crescimento do cristal ocorre espontaneamente e se forma a calcita.



3.4 Solubilidade de dióxido de carbonato em água

A Figura 3.3 mostra o efeito da pressão e da temperatura sobre a solubilidade do CO_2 na água em função da pressão. Oito isotermas mostram dados experimentais de cinco fontes (CARROL, et al., 1991).

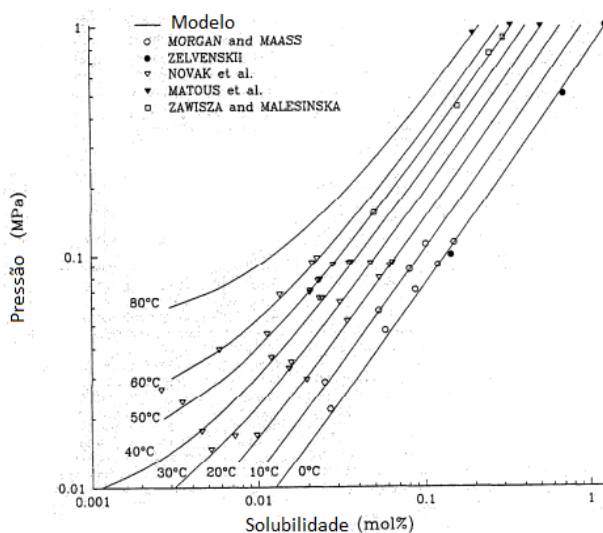


Figura 3.3: Solubilidade de dióxido de carbono em água de 0° a 80°C (CARROL et.al., 1991)

3.5 Consequências de Ca^{++} em água para a saúde e indústria

Um dos fatores que interfere na qualidade da água é a dureza, decorrente do cálcio associado ao bicarbonato (HCO_3^-), o qual se transforma em carbonato de cálcio (pouco solúvel), por aquecimento ou elevação do pH. Os principais íons metálicos que conferem dureza à água são o cálcio (Ca^{2+}) e magnésio (Mg^{2+}), associados ao íon sulfato (SO_4^{2-}). O Ministério da Saúde (MS), através da Portaria 2914/2011, estabelece que o limite de dureza em água para abastecimento, no Brasil, é de no máximo 500 mg CaCO_3/L ou 500 ppm (FREITAS, et al., 2017).

Água contendo cerca de 50 a 75 mg/L cálcio expressa em CaCO_3 , consiste em uma água branda, adequada ao abastecimento público; de 75 a 150 mg/L, moderadamente dura; já de dureza em torno de 200 mg/L, não é adequada ao consumo (AGRESTE, et al., 2001). Note-se que conforme indica-se no paragrafo anterior, existem divergências de informações sobre os limites superiores da concentração de águas duras.

A água dura com a concentração de cálcio na água doméstica podem aumentar o risco de incidência de cálculos renais de 18% a 34% em participantes com mais de 60 anos; altas concentrações de magnésio ($> 5 \text{ mg/L}$) na água doméstica podem reduzir o risco de cálculos renais em 10% a 28% em homens, participantes com idade ≤ 45 anos e participantes sem insuficiência renal, ver a Figura 3.4 (ZHANG et al, 2025).

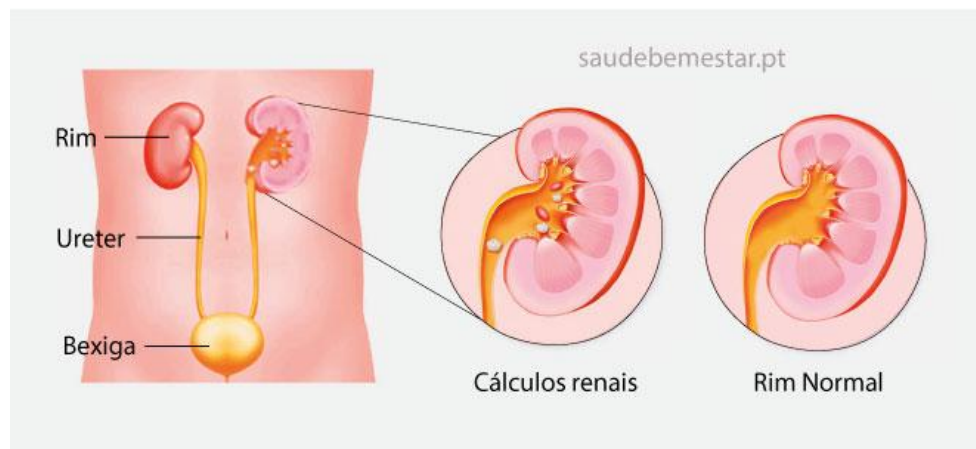


Figura 3.4 Formação de cálculo renal devido ao excesso do íon Ca^{++}

Estudo com a população da Eslováquia, juntamente com sua expectativa de vida, mostrou que é significativamente influenciada pelos níveis de Ca, Mg e a dureza da água no lençol freático. A mortalidade, principalmente por doenças cardiovasculares e oncológicas, bem como por doenças dos sistemas gastrointestinal e respiratório, é notavelmente menor em faixas de concentração desses parâmetros na água subterrânea, conforme segue: Ca 78–155 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, Mg 28–54 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ e dureza da água 2,9–6,1 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$. Um pior estado de saúde e uma menor expectativa de vida são observados com baixos teores ou déficits desses parâmetros na água subterrânea. Os valores limites derivados para esses três parâmetros são cerca de duas vezes superiores em comparação com os limites definidos nas diretrizes eslovacas para água potável. Os pesquisadores da Eslováquia, propõe aumentá-los no caso de água potável proveniente do fornecimento público nas seguintes concentrações: Ca > 50 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, Mg > 25 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ e Ca + Mg > 2 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ (RAPANT *et al.*, 2017). Essa considerações mostram a importância do cálcio e do magnésio para a saúde humana.

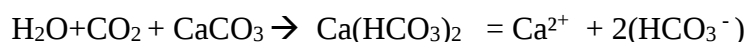
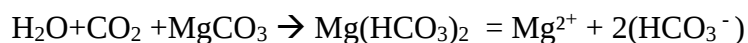
A água dura é uma preocupação significativa para muitas indústrias, pois pode afetar negativamente processos produtivos e a eficiência de equipamentos. O impacto da água dura nos processos industriais é significativo, pois ela pode levar ao acúmulo de incrustações em tubulações, reduzindo consideravelmente o diâmetro, em caldeiras, trocadores de calor e outros equipamentos. Esses depósitos de cálcio e magnésio não só reduzem a eficiência do sistema, mas também aumentam os custos de manutenção e operação (NOVAES, 2025). A Figura 3.5 mostra o efeito prejudicial que a água dura causa nas tubulações.



Figura 3.5 Incrustação depósito de cálcio em tubulações – redução do diâmetro

Pesquisas, no âmbito de retirar e utilizar o dióxido de carbono da atmosfera de forma a aprisioná-lo sob a forma mineral são relevantes, no caso na forma de carbonato de cálcio. Em indústrias que utilizam caldeiras, a água dura com concentração de CaCO_3 acima de 150 ppm provoca deposição de carbonato de cálcio quando em temperaturas elevadas prejudicando os processos industriais (SILVA, 2017).

A alcalinidade da maioria dos suprimentos naturais de água é causada por sais de bicarbonato (HCO_3^-) dissolvidos. As equações a seguir mostram como a água contendo CO_2 da atmosfera e da respiração de organismos do solo dissolve magnésio e cálcio de um mineral comum, a dolomita ($\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$), para produzir dureza e alcalinidade na água subterrânea (KEMMER, 1988):



A Figura 3.6 mostra dados geralmente utilizados para prever a solubilidade do carbonato de cálcio, especificamente relacionados à precipitação em uma operação de amolecimento com cal. A diferença nos resultados entre o processo a quente [acima de aproximadamente 104°C (220°F)] e o processo a frio (temperaturas da água do rio) está consideravelmente além do que seria previsto por dados simples de solubilidade, que mostram uma diminuição de apenas cerca de 2 mg/L de solubilidade na temperatura mais alta. O efeito empírico da temperatura deve ser causado por outros fatores, como a taxa de reação [que, como regra geral, dobra para cada aumento de 10°C (50°F) na temperatura], a natureza do precipitado cristalino ou amorfo e o possível efeito da coagulação de materiais orgânicos em temperaturas mais altas.

Na faixa de pH de 4,4 a 8,2, permanece um equilíbrio entre o excesso de CO_2 e íons bicarbonato. Isso mostra que uma água contendo 1 mg/L de CO_2 e 10 mg/L de alcalinidade tem o mesmo pH que uma contendo 10 mg/L de CO_2 e 100 mg/L de alcalinidade. No primeiro caso, a adição de 1 mg/L de CO_2 produziria uma grande alteração no pH, enquanto no segundo caso, a mesma adição de 1 mg/L de CO_2 não produziria uma alteração perceptível. A alcalinidade modera ou amortece a alteração do pH, e a alcalinidade possui efeito de um tampão (KEMMER, 1988).

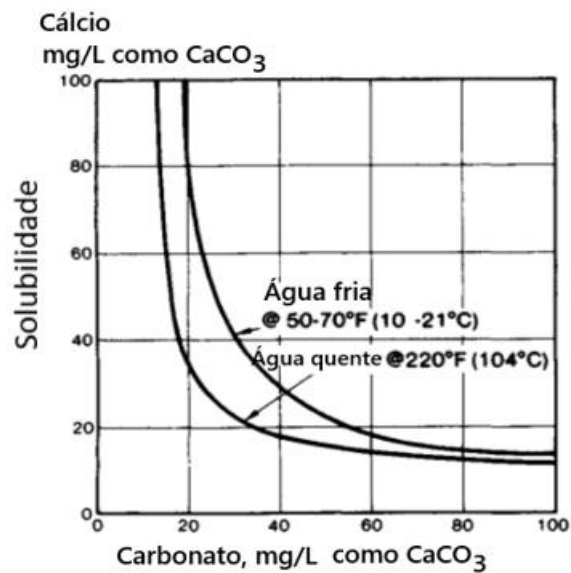


Figura 3.6: Solubilidade de CaCO_3 em água quente e fria – dados empíricos baseados e tempo de reação de 60 a 90 min seguido de sedimentação (KEMMER, 1988)

Devido aos equilíbrios das reações, o controle do cálcio na água requer conceitos e técnicas adequadas de engenharia de tratamento de água.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Agitador para floculação Jar Test 6 Provas Test Mod. 217-02

Em estudo realizado no laboratório da UNIUBE – Campus Aeroporto, usou-se o equipamento agitador *Jar Test*, que trabalha por meio de agitação para floculação. Com a finalidade de obter-se a precipitação do Cálcio da água dura, foram feitos dois experimentos usando este equipamento. Para se determinar a quantidade certa de produtos coagulantes a ser ministrada durante o *Jar Test*, são feitos experimentos com amostras de líquidos (dispostas em frascos ou recipientes) com diferentes níveis de pH e aplicação de doses variadas de agentes coagulantes.

Na primeira etapa, analisou-se o gradiente de velocidade para obter a precipitação do cálcio. Usou-se o gradiente da mistura rápida e da floculação mais apropriados.

Na segunda etapa do experimento, fez-se análise da solubilidade do hidróxido de cálcio, Ca(OH)_2 , em relação à variação de temperatura, e analisou-se a variação do pH.

O principal parâmetro avaliado foi a precipitação do íon Ca^{++} . O *Jar Test*, possui controle de rotação digital microprocessado que possibilita dois modos de operação, manual e automático. No modo de operação manual, um valor da faixa de 10 a 600 rpm é solicitado e o equipamento funciona conforme este set-point, podendo ser alterado a qualquer momento durante seu funcionamento, usou-se no estudo 100 rpm. No modo automático permite a edição de até 4 programas diferentes, de 12 segmentos cada, para a operação em rampas e patamares.

O equipamento contém jarros confeccionados em acrílico transparente de alta resistência com volume interno de 2000 mL com escala de volume graduada. Possui sistema de fixação e centralização dos jarros de fácil utilização o que garante que os jarros não se movimentem no ensaio; Tensão disponível: 220V. Potência 100W, corrente 0,45 A. Ver a Figura 4.1

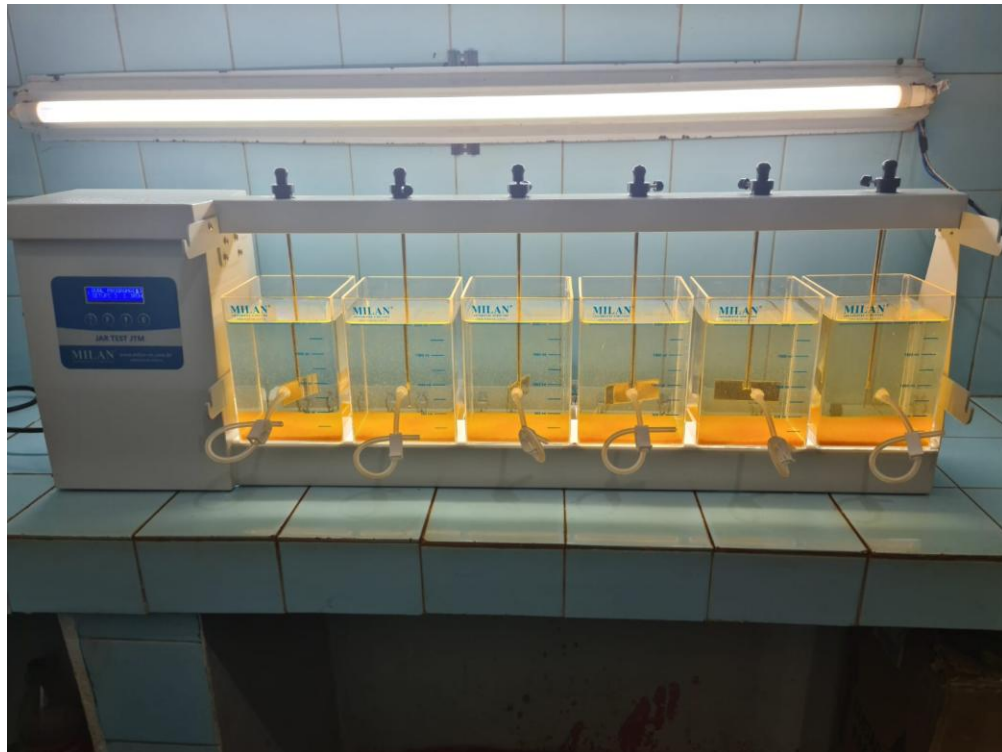


Figura 4.1 . Vista e esquema do Jar Test.

O estudo a seguir foi desenvolvido por Reis, Finzer e Begnini (2017), e descrito com detalhes para subsidiar o desenvolvimento este estudo.

4.1.1 Gradiente de velocidade

Segundo Camp e Stein (1943), os gradientes de velocidades variam consideravelmente no interior de uma câmara de mistura. Na mistura, a potência (P) admitida ao fluido em função da tensão de cisalhamento é dada pela Equação (4.1).

$$P = \tau \cdot \Delta X \cdot \Delta Z \cdot \Delta v \quad (4.1)$$

P é a potência transmitida ao fluido; τ é a tensão de cisalhamento; ΔX e ΔZ , são variações de deslocamento de porções do fluido nas direções X e Z; Δv é a variação de velocidade de porções do fluido.

Como o V é o volume de líquido deslocado:

$$V = \Delta X \cdot \Delta Z \cdot \Delta Z \quad (4.2)$$

Substituindo V na Equação (4.1), tem-se a Equação (4-3):

$$P = \tau \cdot V \cdot \left(\frac{\Delta v}{\Delta Y} \right) \Delta Z \quad (4-3)$$

Sendo τ aplicado para fluidos newtonianos, Lei de Newton da viscosidade (BIRD et al., 2001), Equação (4-4):

$$\tau = \mu \cdot \left(\frac{\Delta v}{\Delta Y} \right) \quad (4.4)$$

Substituindo a Equação (4.4) na Equação (4.3), tem-se a Equação (4.5):

$$\frac{P}{V} = \mu \cdot \left(\frac{\Delta v}{\Delta Y} \right)^2 \quad (4.5)$$

Como:

$$\frac{\Delta v}{\Delta Y} = G \quad (4.6)$$

Sob condições estáveis de trabalho, fornecido por unidade de volume na água da câmara e por unidade de tempo, definiu-se o parâmetro gradiente de velocidade “G” .

Sendo G o gradiente de velocidade. Combinando as Equações (4.5) e (4.6), tem-se:

$$G = \sqrt{\frac{P}{\mu \cdot V}} \quad (4.7)$$

Parte do equipamento, *Jar Test* usado na pesquisa foi mostrado na Figura 4.2, onde são indicadas as dimensões do impeller do equipamento.

A potência é expressa pela Equação (4.8):

$$P = N_p \cdot \rho \cdot N^3 D^5 \quad (4.8)$$

A Figura (4.2) consiste nas dimensões e relações geométricas dos jarros do *Jar Test* usados neste estudo. Medidas em centímetros: Z = 8cm (altura do jarro); T=11,5 cm (comprimento do jarro; D=7,5 cm (comprimento do impeller) e C=2,5 cm (altura do impeler)

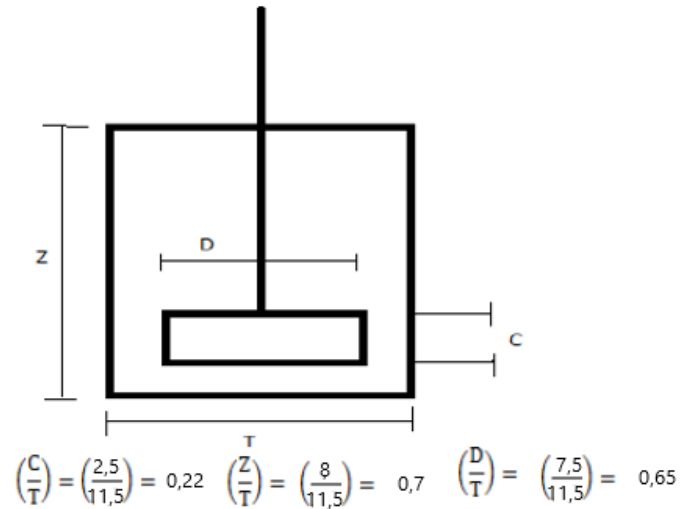


Figura 4.2. Geometria e dimensões do jarro.

Para o equipamento o N_p é obtido na Figura 4.3. Usando $D/T = 0,65$, obtém-se $N_p = 0,25$.

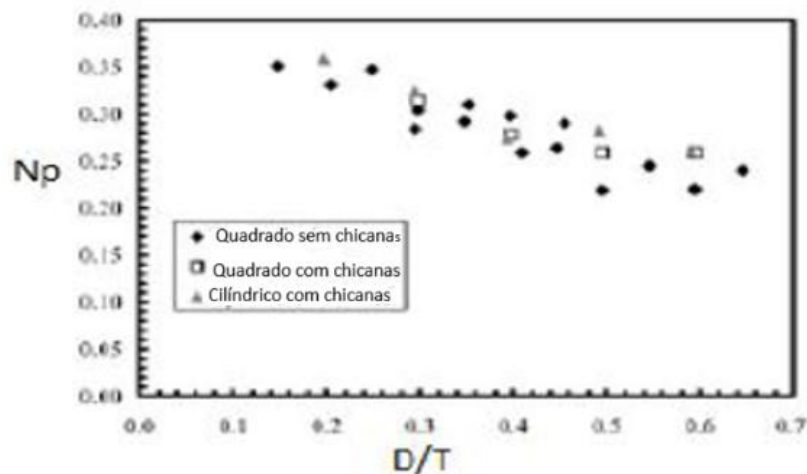


Figura 4.3. Número de Potência do equipamento utilizado: (MITCHELL e MYERS (2008)).

A Figura 4.4 corresponde ao gradiente de velocidade em função da rotação, para o *Jar Test* utilizado (KAYALI *et al*, 2016).

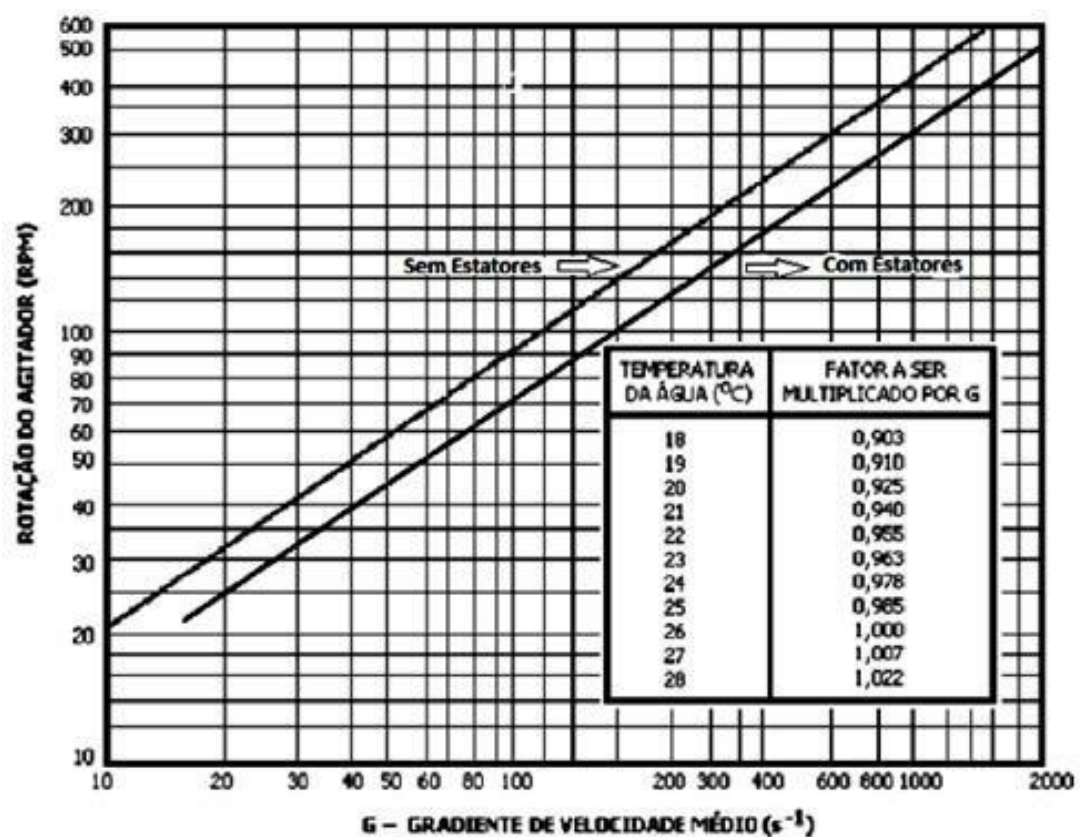


Figura 4.4 Gradiente de velocidade em função da rotação (KAYALI *et al*, (2016).

4.1.2 Solubilidade do Hidróxido de cálcio utilizado no estudo

Neste experimento, foi usado hidróxido de cálcio que apresenta-se como um pó branco, alcalino (pH 12,8), pouco solúvel em água (solubilidade de 1,2 g/L de água, à temperatura de 25° C). Trata-se de uma base forte obtida a partir da calcinação (aquecimento) do carbonato de cálcio, até sua transformação em óxido de cálcio (cal viva). Com a hidratação do óxido de cálcio chega-se ao hidróxido de cálcio e a reação entre este e o gás carbônico leva à formação do carbonato de cálcio (o cálcio precipita) (ESTRELA e PÉCORA, 1997).

No estudo foi utilizado hidróxido de cálcio fabricado pela empresa Synth sendo o teor da base de 95% (5% são impurezas).

O hidróxido de cálcio Ca(OH)_2 é pouco solúvel em água, formando uma solução básica chamada água de cal.

Solubilidade

- A solubilidade do hidróxido de cálcio varia com a temperatura.
- A 20°C, a solubilidade do hidróxido de cálcio é de 0,16 g Ca(OH)_2 /100 g de água.
- A 25°C, a solubilidade do hidróxido de cálcio é de 1,20 g/litro de água.
- A 100°C, a solubilidade do hidróxido de cálcio é de 1,89 g/L.

4.2 pHmetro

Durante o experimento, analisou-se também a variação do pH utilizando o equipamento abaixo descrito, pHmetro.

O Medidor de pH de bancada MY140 MYLABOR, Figura 4.5, possui compensação automática de temperatura (na faixa de 5 a 60°C) e compensação manual de temperatura (na faixa de 0 a 100°C). A resolução de pH é selecionável pelo usuário de 0.1 ou 0.01 e conta com registro de máxima e mínima das análises de pH. Possui memória para 25 registros, conta com iluminação backlight no visor e pode realizar medições de ORP



Figura 4.5. pHmetro Simpla

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Ensaio preliminar

No estudo atual, uma garrafa de água carbonatada (Minalba) foi aberta, após estabilizar a saída de gás carbônico devido à despressurização, quantificou-se o pH, obtendo-se 4,79 na temperatura de 23,2°C. Esse valor está de acordo com os dados da Figura 3-1.

Em ensaio preliminar foram adicionadas 0,30 g de Ca(OH)_2 em 100 mL da água carbonatada, saturada com CO_2 , na pressão de Uberaba (9,81 kPa).

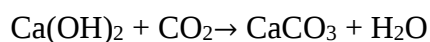
Após mistura e transcorridos 5 minutos o pH foi 5,78; transcorridos outros 5 minutos pH = 5,76; seguiu-se pH 6,08 e 6,16. Como o Ca(OH)_2 estava em excesso, ao ir solubilizando o pH irá aumentar e possivelmente tender ao valor 12,8 do do hidróxido puro, na temperatura de 25°C (ESTRELA e PÉCORA, 1997), o que sofre influência das substâncias dissolvidas na água carbonatada original.

5.2 Estudo de caso carbonatação de água usada para atenuação do cálcio

Neste estudo utilizou-se água gaseificada comercial, cuja pressão interna foi de 24,81 kPa, após aberta, na temperatura de 12°C a 17°C (FLAMIN MINERAÇÃO, 2024).

Utilizando a Figura 3.3, a concentração de dióxido de carbono na água gaseificada comercial é 0,015mol%.

Em 500 mL de água gaseificada, densidade 1000 kg/m³, existe a massa de água expressa em mol, 28 mol. Portanto: a quantidade de matéria em mol de CO_2 é 0,0042 mol. Sendo então, a massa de CO_2 de 0,18g. A reação de carbonatação da água contendo cálcio é dada por:



A massa de Ca(OH)_2 que pode reagir com o CO_2 contido em 500 ml de água carbonatada é:

$$m_{\text{Ca(OH)}_2} = (74/44) \cdot 0,1848 = 0,3108 \text{ g}$$

E os íons Ca^{++} :

$$m_{\text{Ca}^{++}} = (40/74) \cdot 0,3108 = 0,168 \text{ g}$$

Sallum e Finzer (2024), mostraram que para precipitar Carbonato de cálcio usando o gás carbônico em 500 mL de água gaseificada, é necessário 0,3108 g de Ca(OH)_2 .

Em ppm:

$$\text{ppm}_{\text{Ca}^{++}} = (10^6/500,168) \cdot 0,168 = 336 \text{ ppm ou } 336 \text{ mg/L.}$$

A Figura 5.1 trata esquematicamente de um reator de bancada para realizar a carbonatação da água (AHN *et al.*, 2018).

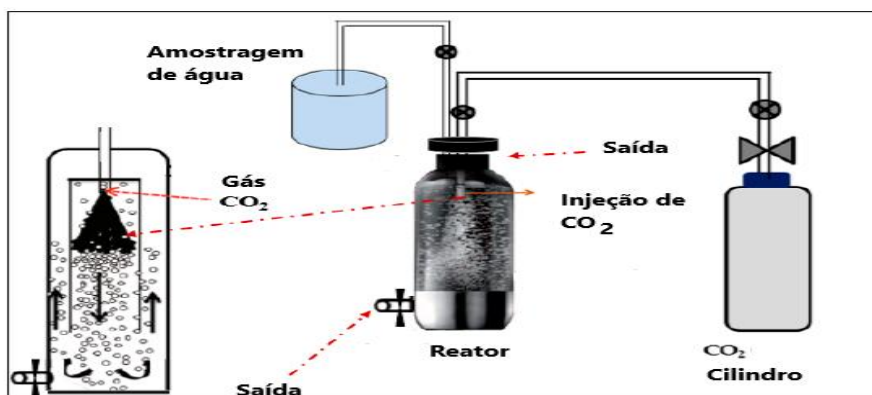


Figura 5.1: Reator para carbonatação da água (AHN *et al.*, 2018).

Durante a carbonatação de água dura pelo reator, três diferentes vazões de CO_2 foram injetadas, proporcionando diferentes tempos de reação. O processo envolveu 7 g/L de CO_2 para uma reação com tempo de 3 min., 14 g/L de gás CO_2 para uma reação de 4 min e 21 g/L com tempo de 5 min. A reação de carbonatação começou com a hidratação do dióxido

de carbono na água, reagiu com os íons Ca^{2+} e Mg^{2+} para formar precipitados de carbonato de cálcio e carbonato de magnésio. Os efeitos da vazão de dióxido de carbono, são descritos na Tabela 1 (AHN et al., 2018).

Tabela 5.1: Concentração de sais de cálcio e magnésio em água dura no tratamento com Dióxido de Carbono (AHN et al., 2018).

Antes da carbonatação (ppm)	Após Carbonatação mg/L	Após Carbonatação mg/L	Após Carbonatação mg/L
	7g/LCO₂ 3 min	14g/LCO₂ 4 min	21g/LCO₂ 5 min
38	24	17	12
84	52	39	22
110	65	50	24
172	108	79	43
344	210	158	90

Ao aumentar a concentração de dióxido de carbono, o tempo de reação diminui, o que mostra que o sistema deve ser otimizado economicamente, para se obter a concentração ótima com o mínimo custo total (fixo e operacional).

O resultado mostra que o tempo de reação consiste em um parâmetro importante no tratamento por carbonatação de água com teor de cálcio elevado, associado à taxa de admissão de dióxido de carbono. Para 344 ppm de dureza, ao operar com 7 g de CO_2/L , com um tempo de 3 minutos, a concentração diminui para 210 ppm; com o tempo de 5 minutos para taxa de 21 g/L, a concentração diminui para 90 ppm. Portanto, o tratamento deve ser otimizado tecnicamente e financeiramente.

5.2 Potência consumida e gradiente de velocidade

Para o sistema em estudo, utilizando a Equação (4-8), tem-se:

$$P = 0,25 \cdot 1000 \cdot \left(\frac{100}{60}\right)^3 0,075^5 = 2,75 \cdot 10^{-3} \text{ W}$$

Utilizando a Equação (4.7), pode-se calcular o gradiente de velocidade:

$$G = \sqrt{\frac{2,75 \cdot 10^{-3}}{10^{-3} \cdot 10^{-3}}} = 52 \text{ s}^{-1}$$

Essa modelagem passou a ser adotada como usual no projeto de unidades de floculação e mistura rápida sendo a parte fundamental de uma unidade de tratamento de água. No sistema de tratamento de água são aplicados dois diferentes tipos de agitação: na floculação, cujo objetivo é promover o contato entre as partículas e a agitação para misturar uniformemente os produtos químicos na água que ocorre na etapa de coagulação, operação que requer uma agitação intensa (MWH,2005). Segundo a NBR 12216 (norma que define os projetos de tratamento de água para abastecimento), os gradientes de velocidade da coagulação são compreendidos entre 10 s^{-1} e 700 s^{-1} e da floculação deve estar entre 10 s^{-1} e 70 s^{-1} .

Esse gradiente é 5,2 vezes maior do que os menores gradientes usados na coagulação ($52/10$) e floculação em tratamento de água; e de 0,074 a 0,71 menor que os maiores gradientes de velocidade descritos, respectivamente. No caso refere-se à neutralização de Ca^{++} com CO_2 , para consumo humano.

Evidentemente, na mudança de escala em unidades ampliadas, o gradiente de velocidade será diferente ao aplicar conceitos de *scale up*.

5.3 Reação de neutralização do hidróxido de cálcio.

Uma reação química foi efetuada usando 100 g de água carbonatada e saturada com CO_2 na pressão atmosférica de Uberaba.

A pressão atmosférica pode ser computada como uma função da altitude Equação (5.1) (McQUISTON *et al.*, 2005).

$$P = a + bH \tag{5.1}$$

Para : $H \leq 1120 \text{ m (4000 ft)}$;

$A = 101,325$ $b = -0,01153$

P expresso em KPa

Uberaba : Altitude 823 m : $P = 101,325 - 0,01153 \times 823 = 91,8 \text{ KPa}$

Utilizando a Figura 3.3, obtém-se a solubilidade do CO_2 em função da pressão atmosférica de Uberaba MG em função da temperatura, conforme Tabela 5.2 e Figura 5.2.

Tabela 5.2 - Solubilidade de CO_2 em solução saturada na pressão atmosférica de Uberaba (91,8 kPa) .

Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	Solubilidade CO_2 (mol %)
0 $^{\circ}$	0,117
10 $^{\circ}$	0,0895
20 $^{\circ}$	0,0794
30 $^{\circ}$	0,0578

Usando a Figura 3.3, quantifica-se que a solubilidade do CO_2 , na solução saturada é de 0,0043 mol de CO_2 a 25 $^{\circ}\text{C}$.

Em termos mássicos:

$$m_{\text{CO}_2} = \frac{0,0043 \text{ mol} \cdot 44}{99,9957 \cdot 18} = 1,05 \cdot 10^{-4} \frac{\text{g CO}_2}{\text{g água}}$$

Portanto em 100 gramas de água carbonatada, ter-se-á: $1,05 \cdot 10^{-2} \text{ g CO}_2$

A solubilidade do hidróxido de cálcio em água é de 1,2 g/L na temperatura de 25 $^{\circ}\text{C}$. O pH da solução saturada em água destilada, medida com pHmetro foi de 12,08 na temperatura de 22,3 $^{\circ}\text{C}$.

A massa de hidróxido de cálcio requerida para reagir com o gás carbônico contido em 100 g de solução saturada na temperatura de 25 $^{\circ}\text{C}$ pode ser calculada:

$$m_{\text{Ca(OH)}_2} = \frac{74 \cdot 1,05 \cdot 10^{-2}}{44} = 0,0177 \text{ g de Ca (OH)}_2$$

À solução de CO₂, 100 mL, foi adicionado 0,012 g de Ca (OH)₂, 10 mL de solução saturada, o resultado é relatado na Tabela (5.1).

Tabela (5.3). Resultado da reação entre o ácido carbônico (H₂CO₃) com o hidróxido de cálcio.

T (minutos)	pH
0	4,79
4	5,78
10	5,96
15	6,08

Verifica-se que o pH 12,08 do hidróxido de cálcio devido a reação com o gás carbônico, e consequente formação de carbonato de cálcio, tende ao pH da solução de ácido carbônico, superior ao estequiométrico, devido a influência de outras substâncias contidas na água carbonatada.

Novos ensaios foram planejados com o uso do *Jar Test*, com quatro provas. Na primeira prova, utilizou-se duas vezes o hidróxido de cálcio estequiométrico; na segunda o estequiométrico, na terceira a metade do estequiométrico e na última 0,25 vezes o estequiométrico.

5.4 Reação de gás carbonico com hidróxido de cálcio em *Jar Test*.

Em função destes resultados, outros ensaios foram realizados com água gaseificada na pressão atmosférica, com inserção de uma solução de Ca(OH)₂ para neutralizar o CO₂ dissolvido (simulando o caso em que a água que possui íons cálcio dissolvidos) .

Em um reator contendo água gaseificada, adiciona-se a quantidade de Ca(OH)₂. Antes da injeção do hidróxido de cálcio (Ca(OH)₂), o pH da solução é ácido. A medida que o hidróxido de cálcio é injetado no reator, mede-se o pH em função do tempo.

Foram efetuados ensaios de precipitação de cálcio com ácido carbônico (CO_2) usando o *JarTest*. Em cada um de 3 jarros foram adicionados 1 L de água gaseificada, em outro jarro foi adicionado água destilada. A água gaseificada estava saturada com CO_2 na pressão de Uberaba 98,1 Kpa. A água gaseificada Minalba – Campos de Jordão, possuía em sua composição, 15,4 mg de Ca^+/L , esse valor foi incluído na concentração de cálcio, além disso existem outros sais em mg/L: bicarbonato, 89,33; magnésio 8,26; nitrato 2,55; sódio 1,0; potássio 0,952; cloreto 0,27; sulfato 0,07; fluoreto 0,04. A temperatura do experimentos variou de 22,6 a 22,7°C. Os impulsores do Jar Test operaram a 100 rpm. Em cada jarro adicionou-se quantidades diferentes de hidróxido de sódio. Quantificou-se o pH das soluções após ocorrência da reação. Os resultados estão sintetizados na Tabela 5.4.

Tabela 5.4. Resultados de reação de hidróxido de cálcio com ácido carbônico.

Massa de água destilada (g)	Massa de água gaseificada (g)	Massa de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (g)	pH
1.000		0	4,87
1.000		0,2085	10,32
	1.000	0,2085	5,50
	1.000	0,1185	5,32
	1.000	0,0735	5,22

Os resultados mostram que em função da reação química, o pH da solução diminui tendendo ao valor da solução saturada de CO_2 em água na pressão de Uberaba, ou seja 4,87. Em um reator industrial contínuo, o fornecimento de CO_2 , também deve ser contínuo, para atenuar o teor de cálcio de água dura. Espera-se que esses resultados sejam úteis para o projeto de reatores no tratamento de água.

6. TRABALHOS FUTUROS

O dióxido de carbono (CO_2), também chamado de gás carbônico ou anidrido carbônico, é um composto inorgânico, gasoso à temperatura ambiente, incolor, inodoro e solúvel em água. A produção de águas gaseificadas e refrigerantes utiliza o gás carbônico dissolvido (ácido carbônico), responsável pela efervescência característica desses produtos. Sua presença nas águas é associada a formação de ácidos por intermédio de reações químicas que ocorrem. Para sua determinação utiliza-se o hidróxido de sódio que “captura” as moléculas de gás carbônico presente na amostra, possibilitando, assim, sua quantificação (ODORCZYK, 2018).

Em trabalhos futuros efetuar a titulação do dióxido de carbono com hidróxido de sódio nas soluções contendo CO_2 .

7 CONCLUSÕES

Tratamento de água para consumo humano é um dos pilares do saneamento básico e manter a sua qualidade em todo o sistema de distribuição é um trabalho extremamente técnico.

A redução do teor de cálcio para consumo humano envolve a aplicação de métodos específicos que têm como objetivo alcançar o equilíbrio entre a qualidade da água e os benefícios à saúde.

Dessa forma, nos experimentos tecnológicos demonstrados neste trabalho, conseguiu-se alcançar de forma imperiosa, o abrandamento da água dura para consumo humano, com a precipitação do íon cálcio, que é o objetivo deste estudo.

É essencial avaliar os custos, a eficiência e os impactos de cada método e técnica aplicados, garantindo que a água fornecida atenda aos padrões de potabilidade e contribua positivamente para a saúde pública.

REFERÊNCIAS

AGRESTE, SÁVIO ANANIAS; SCHOR, NESTOR; HEILBERG, ITA P. Atualização em nefrologia clínica: Papel da constituição físico-química da água optável na litogênese renal. **J. Bras Nefrol**, v. 23, n.1, p.45-48, 2001.

AHN, M.K., CHILAKALA, R., HAN, C., THENEPALLI, T. (2018), Removal of Hardness from Water Samples by a Carbonation Process with a Closed Pressure Reactor. **Water**. Vol. 10 (54). p. 1-12. doi:10.3390/w10010054.

BIRD, R. B.; STEWART, W. E.; LIGHTFOOT, E. N. **Fenômenos de transporte**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC. 2004. 838 p.

CAMP, T. R., STEIN, P. C., Velocity Gradients and Internal Work in Fluid Motion. **Journal of the Boston Society of Civil Engineers**, v. 30, n. 4, p. 219- 237, Oct, 1943.

CARROL, J. J., SLUPSKY, J.D., MATHER, A.E. (1991), The Solubility of Carbon Dioxide in Water at Low Pressure. **J. Phys. Chem. Ref. Data**. Vol 20. (6). p. 1201-1209.

ESTRELA, C.; PÉCORA, J.P. **Características químicas do hidróxido de cálcio. Programa Incentivo à Produção de Material Didático do SIAE - Pró-Reitorias de Graduação e Pós-Graduação da USP**. 1997. 7 p.

FILHO, J.W.S. **Inovações tecnológicas para o tratamento de água para consumo humano**. Tese de Doutorado. UFTM – PPGM. 2019. 79 p.

FLAMIN MINERAÇÃO. (2024), Comunicação Pessoal. Lindoia – SP. GRUPO HÍDRICA. 2024, **Sistema para retirada de calcário da água**.

FRANCISCO, A. A.; POHLMANN, P. H. M.; **Tratamento convencional de águas para abastecimento humano: uma abordagem teórica dos processos envolvidos e dos indicadores de referência.** II Congressos Brasileiro de Gestão Ambiental. Londrina – PR. 2011.

FREITAS, A.C.; ROSSATO, M.R.; ROCHA, J.B. T. **Entendendo a dureza e qualidade da água através da aprendizagem baseada em problemas.** XI Encontro Nacional de Pesquisa em Educação em Ciências – XI ENPEC Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. P 1-8. 2017.

GRUPO HÍDRICA, **CALCARIO-NA-AGUA.** 2024.
<https://grupohidrica.com.br/2024/03/21/calcario-na-agua/>.

HAGHI, R.K.; CHAPOY, A.; PEREIRA, L.M. C., YANG, J., TOHIDI, B. (2017). pH of CO₂ saturated water and CO₂ saturated brines: Experimental measurements and modelling. **International Journal of Greenhouse Gas Control.** V. 66:190-203. 2017. DOI:10.1016/j.ijggc.2017.10.001.

JBN – Jus Brasil Notícias. **Mineração é destaque no PIB goiano.** Disponível em :<[http:// www.jusbrasil.com.br/noticias/428415.html](http://www.jusbrasil.com.br/noticias/428415.html)>

JIAHAO, Z.; HONGCHENG, L.; HAOLIANG, W.; TANG, Y.; YUXIN, Q.; ZHICHENG, T.; JUAN, W.; LI ZHIBIAO, ZHENG HANXIONG, Z. Z. The association between domestic water hardness and kidney stone disease: a prospective cohort study from the UK Biobank. **International Journal of Surgery**, v. 111, p. 1957-1967.

KAYALI, A.; CASTRO, G.M.; SOUZA, J.J.L.L.; SILVA, D.J. Avaliação da eficiência de coagulantes comerciais para aplicação em sistemas de tratamento de água. **The Journal of Engineering and Exact Sciences.** P. 14-33. 2016.

KEMMER, F.N. **The Nalco Water Handbook**. Nalco Chemical Company 2^o Edition. McGraw-Hill. 1988.

LEGNER, C. (2021), Soluções para eliminação da dureza na água. **Revista TAE**. 63. 1-5.

LOERTING, THOMAS; BERNARD, JUERGEN. Aqueous Carbonic Acid (H_2CO_3). (2010). **ChemPhysChem**. P. 1 – 6. DOI: 10.1002/cphc.201000220

MARTHUR,V.K; 2001; **High speed manufacturing process for precipitated calcium carbonate employing sequential pressure carbonation**. US Patente, n 6251356.Disponível em <<http://www.freepatentsonline.com/6251356.html>>

MCQUISTON, F.; PARKER, J.D.; SPITLER , J. D..Heating, **ventilating, and air conditioning : analysis and design**. John Wiley. 6th ed. 2005.

MITCHELL, E. T.; MYERS, K. J. Solids suspension agitation in square tanks: **The Canadian Journal of chemical engineering**. February 2008. Volume 86.

MWH. **Water Treatment: Principles and Design**, 2nd Edition. Wiley. 2005.

NETO, B.B et al . **Como fazer experimentos: pesquisa e desenvolvimento na ciência e na industria**. Campinas:Editora da Unicamp,2001

NOVAIS, W. **Água dura: impactos industriais e soluções de abrandamento**. Waterpure WP. 2015

ODORCZYK, T. V. **Handbook de águas engarrafadas –águas minerais naturais gaseificadas e gasocarbônicas**. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina -IFSC. Campus São Miguel do Oeste. 2018.

OLIVEIRA, F.V. **Processamento de carbonato de cálcio para a aplicação em indústrias de de papel e plástico**. Dissertação de mestrado, Escola de Engenharia/UFMG,

Belo Horizonte, Brasil, 2005.

Portaria MS 518/2004 / Ministério da Saúde, Secretaria de Vigilância em Saúde.
2005, Coordenação Geral de Vigilância em Saúde Ambiental – Brasília: **Editora do Ministério da Saúde**, 30 p.

RAPANT, S.; FAJČÍKOVÁ, K.; SEDLÁKOVÁ, D.; STEHLÍKOVÁ, B. Impact of Calcium and Magnesium in Groundwater and Drinking Water on the Health of Inhabitants of the Slovak Republic. **Int. J. Environ. Res. Public Health** 2017, 14, 278; doi:10.3390/ijerph14030278.

REIS, A.C.A. FINZER, J.R.D.; BEGNINI, M.L. (2017). **Tratamento de água: gradiente de velocidade na coagulação floculação**. XXXVIII Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados. XXXVIII ENEMP. 6 p.

RODRIGUES, M.I.; IEMMA, A.F. **Planejamento de experimentos e otimização de processos**. 1ªEd. Campinas, Casa do Pão, 2005.

SALLUM, S. H.; FINZER, J.R.D. **Tratamento de água para atenuar o teor de cálcio na água**. VIII Encontro de Desenvolvimento de Processos Agroindustriais. Uberaba. 2024.

SILVA, H. M.; DUARTE, F. V. ; OLIVEIRA, A. G. **Águas Subterrâneas**, v. 31, n. 4, p. 310-315, 2017

SOBRAL, F.E., Procedimento alternativo de preparação de carbonato de cálcio precipitado de elevada pureza. **Dissertação de Mestrado. UFC. 1995.**

SOUTO, E.C.S., **Estudo de condições operacionais para a obtenção de carbonato de cálcio precipitado**. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Química/UFU, Uberlândia-MG; 2008.

ZHANG JIAHAO, LUO HONGCHENG, WU HAOLIANG, QIAN YUXIN, TANG ZHICHENG, WANG JUAN, LI ZHIBIAO, ZHENG HANXIONG. The association between

domestic water hardness and kidney stone disease: a prospective cohort study from the UK Biobank. **International Journal of Surgery**, v. 111, p. 1957-1967. 2025.