v7.n5.2026

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

REAÇÃO DE HIDRÓXIDO DE CÁLCIO COM GÁS CARBÔNICO: GRADIENTE DE VELOCIDADE NA CÂMARA DO *JAR TEST*

REACTION OF CALCIUM HYDROXIDE WITH CARBON DIOXIDE: VELOCITY GRADIENT IN THE JAR TEST CHAMBER

REACCIÓN DEL HIDRÓXIDO DE CALCIO CON EL DIÓXIDO DE CARBONO: GRADIENTE DE VELOCIDAD EN LA CÁMARA DO JAR TEST

Helenice Saud Sallum[1], José Roberto Delalibera Finzer[2]

e747828
https://doi.org/10.47820/recima21.v7i5.7828

PUBLICADO: 05/2026

RESUMO

Tratamento de água para consumo humano tem como grande desafio a estabilidade do padrão de qualidade da água no sistema de abastecimento. Tem-se a preocupação com a alta concentração 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 a saúde e acarreta limitações para utilização em vários segmentos. O objetivo deste estudo consistiu em efetuar a reação de cálcio contido em água usando gás carbônico, para ocorrer precipitação e quantificar o gradiente de velocidade usando o equipamento *Jar Test*. Conclui-se que os gradientes de concentração operacionais foram: 5,2 vezes maior do que os menores gradientes usados na coagulação e floculação em tratamento de água; e de 0,074 a 0,74 menor que os maiores gradientes de velocidade descritos, respectivamente.

PALAVRAS-CHAVE: Carbonatação. Cálcio. Precipitação.

ABSTRACT

Water treatment for human consumption faces the significant challenge of maintaining consistent water quality within the supply system. There is particular concern about high calcium concentrations in regions where soil is formed by the erosion of limestone rocks, resulting in water with calcium levels exceeding the limits prescribed by regulatory bodies. This leads to health problems and limitations for use in various sectors. The objective of this study was to react calcium in water using carbon dioxide to induce precipitation and quantify the velocity gradient using a Jar Test. The results showed that the operational concentration gradients were: 5.2 times greater than the lowest gradients used in coagulation and flocculation in water treatment; and 0.074 to 0.74 times lower than the highest velocity gradients described, respectively.

KEYWORDS: *Carbonation. Calcium. Precipitation.*

RESUMEN

El tratamiento del agua para consumo humano se enfrenta al importante reto de mantener una calidad constante en el sistema de suministro. Existe una preocupación particular por las altas concentraciones de calcio en regiones donde el suelo se forma por la erosión de rocas calizas,

---

[1] Graduada em Engenharia Civil (1980) e mestra em Engenharia Química pela Universidade de Uberaba (1980). Atualmente é Analista de Sistemas - Engenheira Civil da CODAU – Companhia Operacional de Desenvolvimento, Saneamento e Ações Urbanas - Uberaba - MG.

[2] Graduado em Engenharia Química pela Universidade Federal de Uberlândia (1973), mestre em Engenharia de Alimentos pela Universidade Estadual de Campinas (1984) e doutor em Engenharia de Alimentos pela Universidade Estadual de Campinas (1989). Atualmente é professor na UNIUBE: Curso de Mestrado Profissional em Engenharia Química e do Mestrado em Sanidade e Produção Animal nos Trópicos.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

lo que resulta en agua con niveles de calcio que superan los límites establecidos por los organismos reguladores. Esto conlleva problemas de salud y limitaciones para su uso en diversos sectores. El objetivo de este estudio fue hacer reaccionar el calcio en el agua utilizando dióxido de carbono para inducir la precipitación y cuantificar el gradiente de velocidad mediante una prueba de jarra. Los resultados mostraron que los gradientes de concentración operacionales fueron: 5,2 veces mayores que los gradientes más bajos utilizados en la coagulación y floculación en el tratamiento del agua; y entre 0,074 y 0,74 veces menores que los gradientes de velocidad más altos descritos, respectivamente.

***PALABRAS CLAVE**: Carbonatación. Calcio. Precipitación.*

INTRODUÇÃO

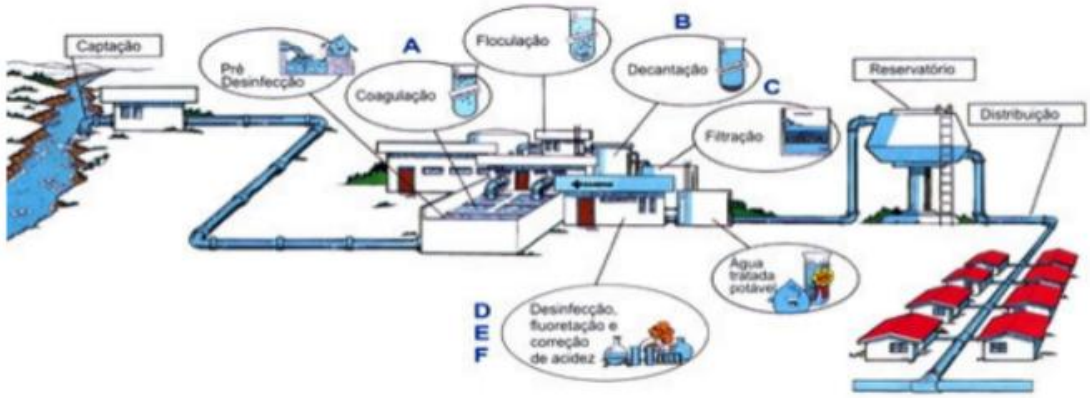
O objetivo geral deste estudo consistiu em efetuar a reação de cálcio contido em água usando gás carbônico e quantificar o gradiente de velocidade que consiste em um parâmetro técnico no tratamento de água, usando o equipamento *Jar Test*. Os objetivos específicos consistiram em descrever os resultados químicos-tecnológicos, obtidos na etapa de tratamento da água, usando gás carbônico.

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 (Francisco et al., 2011). Apesar do tratamento convencional de água ser consolidado, a remoção de cálcio dissolvido utilizando gás carbônico apresenta desafios operacionais, principalmente em relação à cinética de reação. O problema deste estudo consiste em avaliar como o gradiente de velocidade aplicado no equipamento *Jar Test*, influencia a eficiência da reação entre, o cálcio contido em água preparada com concentração definida de cálcio, e o gás carbônico.

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).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Figura 1. Tratamento Convencional de água



Fonte: Francisco *et al*., 2011.

A dureza da água é um desafio global de qualidade. Embora cerca de 70% da superfície terrestre seja coberta por água, 97,5% é água salgada (não potável) e apenas 2,5% é água doce. Deste pequeno percentual, uma parcela mínima é de fácil acesso para consumo. A água dura caracteriza-se pela elevada concentração de íons de cálcio (Ca+2) magnésio (Mg+2), dissolvidos de rochas e solos, superando a taxa de 85% de ocorrência em certas regiões. A intensidade da dureza é proporcional à quantidade desses cátions: águas com teores acima de 150 mg/L são consideradas duras; abaixo de 75 mg/L, moles; e entre 75 e 150 mg/L, moderadas (Legner, 2021; Ahn *et al*., 2018).

1. REFERENCIAL TEÓRICO

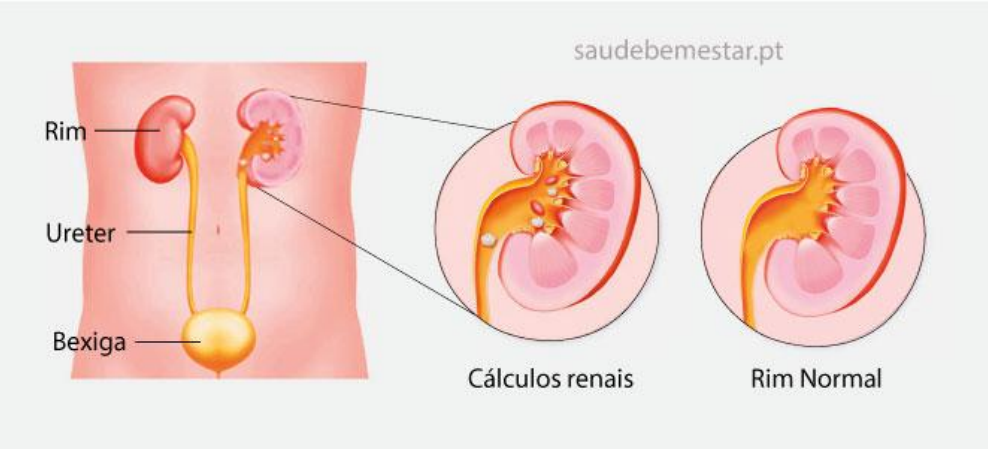
1.1. Consequências de CA++ em água para a saúde e indústria

A água dura com a concentração de cálcio na água doméstica pode aumentar o risco de incidência de cálculos renais de 18% a 34% em participantes com mais de 60 anos; altas concentrações de magnésio (> 5 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 2 (Zhang *et al*., 2025).

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).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Figura 2. Formação de cálculo renal devido ao excesso do íon Ca++



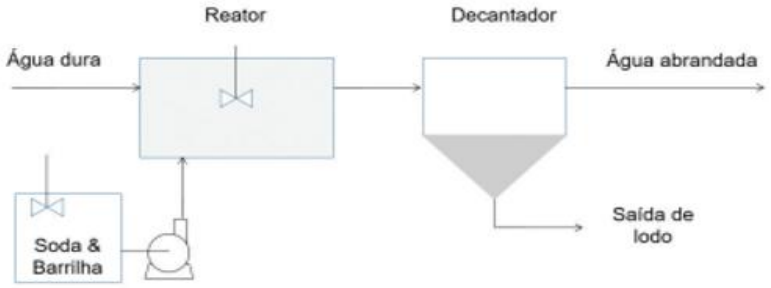
Fonte: Zhang *et al.,* 2025.

1.2. Abrandamento da água dura

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

Figura 3. Processo químico no abrandamento da água



Fonte: Legner, 2021.

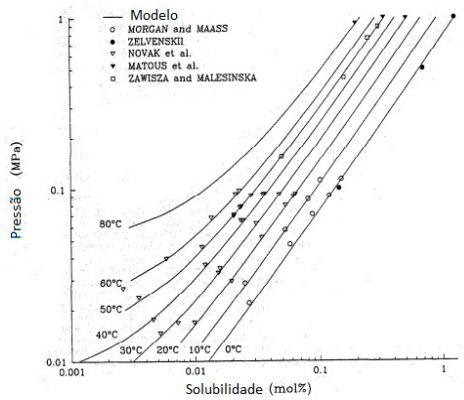
A injeção de hidróxido de sódio e carbonato de sódio em um reator com água ocasionará a precipitação de cálcio na forma de $CaCO_3$ (carbonato de cálcio). Após a precipitação no reator, o carbonato de cálcio sedimenta no decantador e a água já sai abrandada, separada no topo do decantador.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

1.3. Solubilidade de dióxido de carbono em água

A Figura 4 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 (Carroll, *et al.,* 1991).

Figura 4. Solubilidade de dióxido de carbono em água de 0º a 80ºC



Fonte: Carroll *et al.,* 1991.

1.4. 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 (1).

$$P = \tau \cdot \Delta X \cdot \Delta Z \cdot \Delta v \quad (1)$$

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 V é o volume de líquido deslocado:

$$V = \Delta X \cdot \Delta Y \cdot \Delta Z \quad (2)$$

Substituindo na Equação (1), tem-se a Equação (3):

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

Sendo τ aplicado para fluidos newtonianos, a lei de Newton da viscosidade é expressa pela Equação (4): (Bird et al., 2004).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

$$\tau = \mu \cdot \left(\frac{\Delta v}{\Delta Y}\right) \quad (4)$$

Substituindo a Equação (4) na Equação (3), tem-se a Equação (5):

$$\frac{P}{V} = \mu \cdot \left(\frac{\Delta v}{\Delta Y}\right)^2 \quad (5)$$

Como:

$$\frac{\Delta v}{\Delta Y} = G \quad (6)$$

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

Combinando as Equações (5) e (6), tem-se:

$$G = \sqrt{\frac{P}{\mu \cdot V}} \quad (7)$$

2. METODOLOGIA

2. 1. Agitador para floculação *Jar Test* 6 provas TEST MOD. 217-02

No estudo realizado, usou-se o equipamento agitador *Jar Test*, que trabalha por meio de agitação para floculação.

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: 220 V. Potência 100 W, corrente 0,45 A. Ver a Figura 5.

A potência é expressa pela Equação (8):

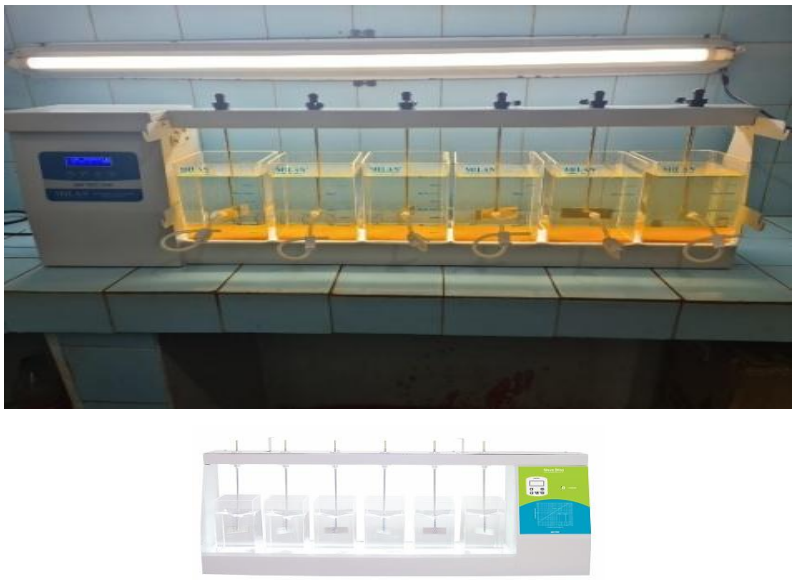
$$P = N_P \cdot \rho \cdot \boldsymbol{N}^3 D^5 \quad (8)$$

Sendo: N_P o número de potência, ρ a densidade da água, N, a velocidade do impulsor em rotações/s, e D o diâmetro do impulsor (McCabe et al., 2001).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

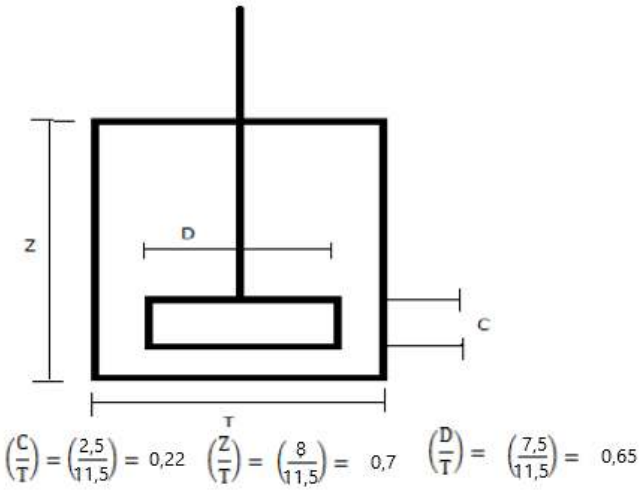
A Figura (6) mostra as dimensões e relações geométricas dos jarros do Jar Test usados neste estudo: Medidas em centímetros: Z = 8 cm (altura do jarro); T=11,5 cm (comprimento do jarro; D=7,5 cm (comprimento do impeler) e C=2,5 cm (altura do impeler).

Figura 5. Vista e esquema do *Jar Test*



Fonte: Sallum, 2025.

Figura 6. Geometria e dimensões do jarro

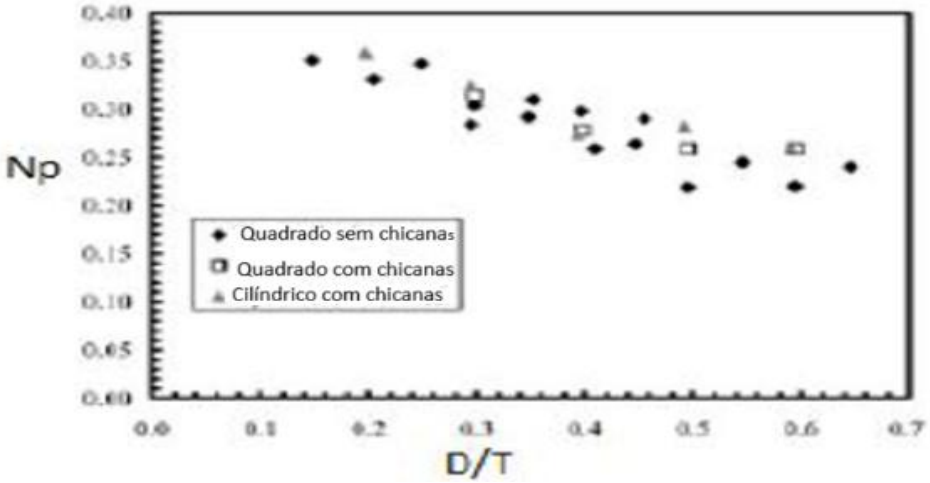


Fonte: Sallum, 2025.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Para o equipamento o N_P é obtido na Figura 7.

Figura 7. Número de Potência do equipamento utilizado

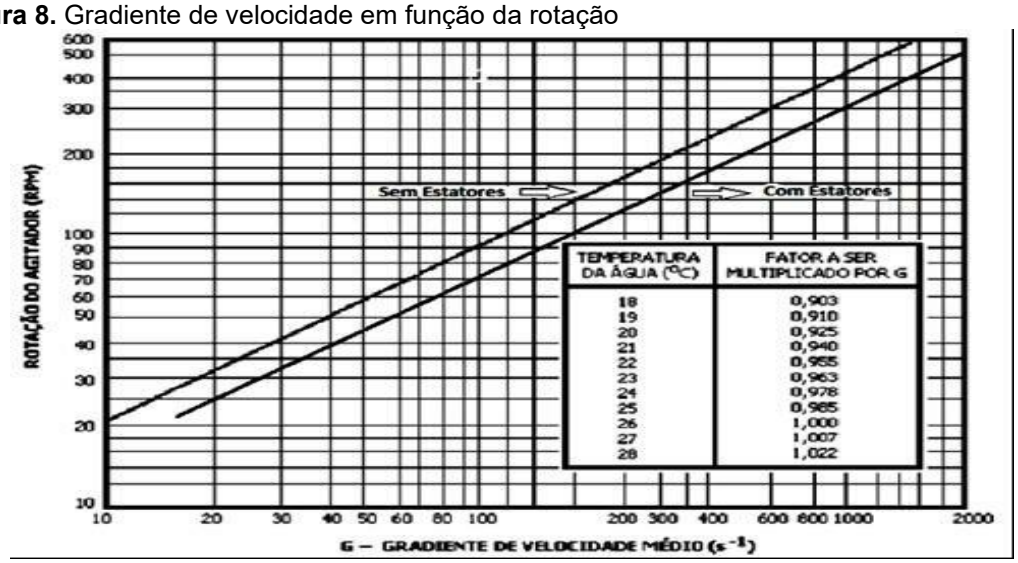


Fonte: Mitchell e Myers, 2008.

Usando D/T = 0,65, obtém-se N_P = 0,25.

A Figura 8 corresponde ao gradiente de velocidade em função da rotação, para o *Jar Test* utilizado (Kayali *et al.,* 2016).

Figura 8. Gradiente de velocidade em função da rotação



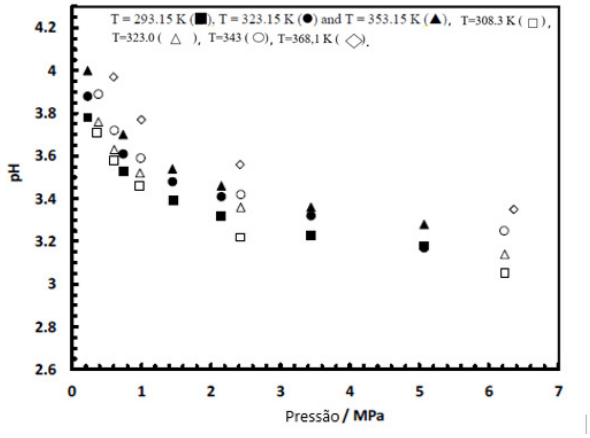
Fonte: Kayali *et al*, 2016.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

2.2. Comportamento de soluções saturadas de CO_2 em água

Usando método espectroscópico, Haghi *et al.* (2017), efetuaram medições de pH em soluções saturadas de CO_2 em H_2O em temperaturas de 293,15 K, 323,15 K e 353 K, mostrado na Figura 9. Na mesma figura são relatados dados experimentais de medidas de pH por Peng e colaboradores (2013), citado por Haghi e colaboradores (2017).

Figura 9. pH de soluções saturadas de CO_2 – H_2O em função da pressão. Símbolos fechados são resultados simulados e símbolos vazios são experimentais



Fonte: Haghi (2017).

No geral, os resultados obtidos neste estudo (Haghi et al., 2017) pelo método espectroscópico e o de Peng et al. (2013), 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.

Analisou-se o comportamento da solução saturada de dióxido de carbono em água na pressão atmosférica de Uberaba (onde foi realizado o estudo) de 0,098 MPa, de acordo com a Figura 4, verifica-se que o pH da solução ficou acima de 4, para temperatura variando de 293 a 368 K (entre 20ºC e 95ºC).

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 23,2ºC. A água da garrafa se encontra saturada com CO_2, após abertura da garrafa, na temperatura ambiental e pressão de Uberaba. Esse valor está de acordo com os dados da Figura 9.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Efetuou-se repetição, conduzindo os experimentos de atenuação do teor de cálcio em três vasos do *Jar Test*, mais um vaso em que só continha água desmineralizada e um outro vaso continha água desmineralizada e hidróxido de cálcio.

2.3. Reação de neutralização do hidróxido de cálcio

Uma reação química foi efetuada usando 100 g de água carbonatada (Minalba) e saturada com CO_2 na pressão atmosférica de Uberaba. A água carbonatada foi proveniente de garrafa de água carbonatada, após abertura e estabilização da saída de gás carbônico devido à despressurização, pois ela se torna saturada na pressão atmosférica de Uberaba na temperatura de 23,2ºC.

A pressão atmosférica pode ser computada como uma função da altitude Equação (9) (McQuiston & Parker, 2005).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Resultados de comportamento preliminar de reação química

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

$$P= a+bH \quad (9)$$

Para: H <= 1120 m (4000 ft); A= 101,325; b = -0,01153; P expresso em KPa; Uberaba: Altitude 823 m: P= 101,325 - 0,01153x823 = 91,8 KPa.

Utilizando a Figura 4, obtém-se a solubilidade do CO_2 em função da pressão atmosférica de Uberaba MG e da temperatura, conforme a Tabela 1.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Tabela 1. Solubilidade de CO_2 em solução saturada na pressão atmosférica de Uberaba (91,8 kPa)

Temperatura (ºC)	Solubilidade CO_2 (mol %)
0 º	0,1170
10º	0,0895
20º	0,0794
30º	0,0578

Usando a Figura 4, quantifica-se que a solubilidade do CO_2, na solução saturada é de 0,0043 mol de CO_2% a 25ºC.

Em termos mássicos:

$$m_{CO_2} = \frac{0{,}0043 \text{ mol} \cdot 44}{99{,}9957 \cdot 18} = 1{,}05 \cdot 10^{-4} \frac{\text{g } CO_2}{\text{g água}}$$

Portanto, em 100 gramas de água carbonatada, ter-se-á: $1{,}05 \cdot 10^{-2}$ g CO_2

A solubilidade do hidróxido de cálcio em água é de 1,2 g/L na temperatura de 25ºC. O pH da solução saturada em água destilada, medida com pHmetro foi de 12,08 na temperatura de 22,3ºC.

A massa de hidróxido de cálcio requerida para reagir com o gás carbônico contido em 100 g de solução saturada na temperatura de 25ºC pode ser calculada:

$$m_{Ca(OH)_2} = \frac{74 \cdot 1{,}05.10^{-2}}{44} = 0{,}0177 \text{ g de } Ca(OH)_2$$

À solução de CO_2, 100 mL, foi adicionado 0,012 g de $Ca(OH)_2$, menor que o estequiométrico, 10 mL de solução saturada, o resultado é relatado na Tabela (2).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Tabela 2. Resultado da reação entre o ácido carbônico (H_2CO_3) 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 (ácido 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 três provas. Na primeira prova, utilizou-se o hidróxido de cálcio 1,2 vezes o estequiométrico; na segunda o hidróxido de cálcio 0,7 vezes o estequiométrico, na terceira 0,4 vezes o estequiométrico.

3.2. Reação de gás carbônico com hidróxido de cálcio em Jar Test

Ensaios foram realizados com água gaseificada na pressão atmosférica, com inserção de uma solução de $Ca(OH)_2$ para neutralizar o CO_2 dissolvido (simulando o caso em que a água possui íons cálcio dissolvidos).

Em um reator contendo água gaseificada, adiciona-se uma quantidade de $Ca(OH)_2$. Antes da adição do hidróxido de cálcio $Ca(OH)_2$, o pH da solução é ácido. À medida que o hidróxido de cálcio é adicionado no reator, mede-se o pH em função do tempo.

A reação que ocorre é a seguinte:

$$Ca(OH)_2 + CO_2 \rightarrow CaCO_3 + H_2O$$

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 outros dois jarros foram adicionados 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 nos experimentos variou de 22,6 a 22,7ºC. Os impulsores do *Jar Test* operaram a 100 rpm. Em cada jarro adicionou-se

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

quantidades diferentes de hidróxido de cálcio. Quantificou-se o pH das soluções após ocorrência da reação. Os resultados estão sintetizados na Tabela 3.

Tabela 3. Resultados de reação de hidróxido de cálcio com ácido carbônico

Massa de água destilada (g)	Massa de água gaseificada (g)	Massa de $Ca(OH)_2$ (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.

3.3. Potência consumida e gradiente de velocidade

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

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

Utilizando a Equação (7), pode-se calcular o gradiente de velocidade:

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

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}.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Esse gradiente (obtido neste estudo) 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 0,74 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*.

4. CONSIDERAÇÕES

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 e aplicações industriais.

Dessa forma, nos experimentos tecnológicos demonstrados neste trabalho, conseguiu-se alcançar, o abrandamento da água dura para consumo humano, com a precipitação do íon cálcio, que é o objetivo deste estudo, e obter o gradiente de velocidade, importante para o projeto de unidades ampliadas. O pH da água contendo 0,2085 g de $Ca(OH)_2$ dissolvido em 1.000 g de água destilada foi quantificado em 10,32. O resultado da mesma massa adicionada em 1.000 g de água saturada com CO_2, consistiu e pH 5,5, devido à precipitação do cálcio dissolvido. Isso mostra que a técnica é adequada para o tratamento de água com íons cálcio superior ao prescrito para consumo em condições seguras para casos específicos.

O gradiente de velocidade quantificado no teste com *Jar Test*, é 5,2 vezes maior do que os menores gradientes usados na coagulação e floculação em tratamento de água; e de 0,074 a 0,74 menor que os maiores gradientes de velocidade descritos, respectivamente. Assim, o objetivo do estudo foi alcançado que consistiu em atenuar o teor de cálcio na reação com o gás carbônico que ao ser dissolvido em água, gera o ácido carbônico e quantificação de gradiente de velocidade no sistema reacional.

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.

AGRADECIMENTOS

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

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

suporte dado ao desenvolvimento dessa dissertação (Processos: MPR-01119-16; APQ-01203-23).

REFERÊNCIAS

AHN, M.K., CHILAKALA, R., HAN, C., THENEPALLI, T. Removal of Hardness from Water Samples by a Carbonation Process with a Closed Pressure Reactor. **Water**. v. 10, n.54. p.1-12, 2018. 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, 1943.

CARROLL, J. J., SLUPSKY, J.D., MATHER, A.E., The Solubility of Carbon Dioxide in Water at Low Pressure. **J. Phys. Chem**. Ref. Data. v 20, n.6, p. 1201-1209. 1991. DOI: 10.1063/1.555900.

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

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

HAGHI, R.K.; CHAPOY, A.; PEREIRA, L. M. C., YANG, J., TOHIDI, B., pH of CO2 saturated water and CO_2 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.

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.
DOI: 10.18540/2446941602032016014

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

McCABE, W. L.; SMITH, J. C.; HARRIOT, P. (2001), Unit operations of chemical engineering. 6th. Boston: McGraw Hill. 2001, 1114 p.

McQuiston, F. C., Parker, J. D. Heating, ventilating and air conditioning: analysis and design. 4th. New York: John Wiley & Sons, Inc. 1994.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

MITCHELL, E. T.; MYERS, K. J. Solids suspension agitation in square tanks: **The Canadian Journal of chemical engineering**. February. Volume 86. 2008.
DOI: 10.1002/cjce.20004

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

NOVAIS, W. Água dura: impactos industriais e soluções de abrandamento. **Waterpure WP**. 2025.

SALLUM, H. S. Atenuação do teor de cálcio da água dura para consumo humano. Dissertação de Mestrado. UNIUBE-PPGEQ. 2025. 30 p.

ZHANG J., LUO H., WU H., QIAN Y., TANG Z., WANG J., LI Z., ZHENG H., Tang F., He 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. 2025.
DOI: 10.1097/JS9.0000000000002198.

Digitally signed by RECIMA21 REVISTA CIENTIFICA MULTIDISCIPLINAR LTDA:40166538000195.
Timestamp: 2026-04-29 14:02:24 -03.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.