

REVISTA AIDIS

de Ingeniería y Ciencias Ambientales:
Investigación, desarrollo y práctica.

REMOÇÃO DE ALUMÍNIO EM ÁGUAS PARA ABASTECIMENTO PÚBLICO POR MEIO DE PRECIPITAÇÃO QUÍMICA COM HIDRÓXIDO DE CÁLCIO

*Sérgio Carlos Bernardo Queiroz¹
Magno do Nascimento Pimenta¹
Giulliano Guimarães Silva²
Victor Garcia Aristides Oliveira¹

ALUMINUM REMOVAL IN PUBLIC WATER SUPPLY BY
CHEMICAL PRECIPITATION WITH CALCIUM HYDROXIDE

Recibido el 15 de junio de 2015; Aceptado el 29 de enero de 2016

Abstract

The presence of residual aluminum in drinking water has become a matter of concern due to its relation to neurological diseases (such as neurodegeneration, encephalopathy, dialysis dementia, Alzheimer's disease and neurobehavioral changes) and possible contribution to the Haze formation at the end of the treatment, thus reducing the efficiency of the disinfection process. Since the aluminum species present in the water may provide greater bioavailability and potential are more readily absorbed from the gastrointestinal tract. The project's main objective was to study the removal of metal ion Al^{3+} present in water intended for supply, using calcium hydroxide as coagulant due to high availability, low cost and complexity of it. By increasing the pH, $Ca(OH)_2$ involves chemical precipitation of aluminum by formation of gelatinous precipitate of aluminum hydroxide. The methodology generally has been carried out in laboratory scale at the University of Tocantins by testing in evaluating Jarrestes two treatment technologies: direct filtration, and the conventional treatment (full cycle), using both the $Ca(OH)_2$ as coagulant agent. The study was from synthetic water solution of aluminum prepared in the laboratory by diluting in distilled water. The results showed that to meet the recommended levels by decree 2,914 / 2011 of the Ministry of Health, of Brazil, concentration below 0.200 mg/L of Al in potable water and pH between 6.0-9.5, one should opt for chemical precipitation $Ca(OH)_2$ in direct filtration technology. The same was shown to be superior to conventional treatment technology in terms of aluminum removal, being required only 2 mg/L of $Ca(OH)_2$ 0.5% to reach 0.179 mg/L, which is below the recommended threshold ceiling .

Key Words: Aluminum removal, $Ca(OH)_2$, conventional processing technology, direct filtration technology.

¹ Universidade Federal do Tocantins, Brasil.

² Instituto Federal do Tocantins, Brasil.

*Autor corresponsal: 406 N Alameda 10 Res. Vinícius de Moraes Bloco 3 Apart. 104 – Palmas - TO - CEP: 77006-492 – Brasil.
Email: sergiocbq@gmail.com

Resumo

A presença de um residual de alumínio nas águas de consumo tem-se tornado objeto de preocupação devido a sua relação a doenças do foro neurológico (como a neuro degeneração, encefalopatia, demência dialítica, doença de Alzheimer e alterações neuro comportamentais) e na possível contribuição para a formação de turvação no final do tratamento, reduzindo, assim, a eficiência do processo de desinfecção. Uma vez que as espécies de alumínio presentes na água podem apresentar maior potencial de biodisponibilidade e serem mais facilmente absorvidas pelo trato gastrointestinal. O objetivo principal desse trabalho foi estudar a remoção do íon metálico Al^{3+} presente em água destinada para abastecimento, utilizando o Hidróxido de Cálcio como agente coagulante, devido a alta disponibilidade, baixo custo e complexidade do mesmo. Ao aumentar o pH, o $Ca(OH)_2$ acarreta a precipitação química do alumínio pela formação de precipitado gelatinoso de hidróxido de alumínio. A metodologia realizada por meio de ensaio em Jarreste, avaliou duas tecnologias de tratamento: a filtração direta e o tratamento convencional (ciclo completo), ambas usando o $Ca(OH)_2$ como agente coagulante. A água de estudo foi proveniente de solução sintética de alumínio preparada em laboratório por diluição em água destilada. Os resultados mostraram que para atender os níveis preconizadas pela portaria 2,914/2011 do Ministério da Saúde do Brasil, ou seja, concentração abaixo de 0.200 mg/L de Al em água para abastecimento e pH entre 6.0-9.5, deve-se optar pela precipitação química com $Ca(OH)_2$ na tecnologia de filtração direta. A mesma mostrou-se superior a tecnologia de tratamento convencional em termos de remoção de alumínio, sendo necessário apenas 2 mg/L de $Ca(OH)_2$ a 0.5% para chegar à 0.179 mg/L, ou seja, abaixo do limite preconizado.

Palavras-chave: remoção de alumínio, $Ca(OH)_2$, tecnologia de tratamento convencional, tecnologia de filtração direta.

Introdução

De acordo com Brasil (2011), em meio aos múltiplos usos da água, tem-se como maior relevância o uso destinado ao consumo humano seguido da dessedentação de animais. O consumo humano responde, no Brasil, por aproximadamente 10% da demanda de água total. A água destinada a este uso deve possuir características microbiológicas, físicas, químicas, radioativas e organolépticas que atendam ao padrão de potabilidade para não oferecer riscos à saúde, conforme estabelece a Portaria nº 2,914/2011 do Ministério da Saúde.

Segundo Eckhardt Schneider (2009), grande parte da reserva de água doce em nosso planeta não se encontra com potabilidade aceitável. As águas subterrâneas, na maioria das vezes provenientes de poços, via de regra são menos contaminadas por fatores biológicos e químicos que os mananciais superficiais, pelo fato de não ficarem diretamente expostas aos diversos agentes poluentes. Entretanto, a utilização das águas subterrâneas tem sido crescente, sendo de extrema importância o controle e monitoramento da qualidade dessas águas, visto que os esgotos domésticos, industriais e fertilizantes podem comprometer a qualidade e consequentemente o uso para abastecimento.

Nas últimas décadas, a presença de um residual de alumínio nas águas de consumo tem-se tornado objeto de preocupação e discussão por entre a comunidade científica. Esta preocupação está assente na ligação feita, em diversos estudos, entre a presença de teores de alumínio na água de consumo humano e doenças do foro neurológico (como neurodegeneração, encefalopatia, demência dialítica, doença de Alzheimer e alterações neurocomportamentais) e na possível contribuição para a formação de turvação no final do tratamento, reduzindo, assim, a eficiência do processo de desinfecção (Rosalino, 2011).

A exposição humana ao alumínio é inevitável, uma vez que está presente numa vasta gama de produtos e é utilizado em diversas áreas. No entanto, existe uma considerável preocupação no que respeita ao alumínio que é ingerido tanto nos alimentos como na água, em especial na água. Essa preocupação está assente nas espécies de alumínio presentes na água, uma vez que estas podem apresentar maior potencial de biodisponibilidade e serem mais facilmente absorvidas pelo trato gastrointestinal (Rosalino, 2011).

Marmos (2009) realizou uma verificação do nível de contaminação de águas subterrâneas na cidade de Parintins, Amazonas. O estudo verificou que dos 18 poços tubulares do sistema público, apenas dois apresentaram concentrações de alumínio, nitrato e amônia de acordo com a legislação. Os 16 poços restantes mostram concentrações de alumínio variando de 0.3 à 2.0 mg/L, nitrato de 11 a 49 mg/L e amônia até 2.9 mg/L.

De acordo com um estudo da concentração de metais em águas realizado na região metropolitana de Recife - RMR por (Silva *et al.*, 2010), verificou-se que dos 15 metais analisados, somente o alumínio, ferro e manganês apresentaram valores médios acima do permitido pela Portaria nº 2,914/2011 do Ministério da Saúde. Já no município de Ribeirão Preto-SP, foram encontrados concentrações de até 2,672 mg/L, podendo-se concluir que a população tem consumido concentrações superiores as permitidas pela legislação (Devecchiet *al.*, 2006).

De acordo com Folzke (2013), as principais técnicas convencionais de remoção de íons metálicos são as de precipitação e oxidação. A técnica mais usual, a precipitação química, é regida pelos princípios químicos de solubilidade dos metais. A precipitação química consiste na adição de reagentes químicos para alterar o estado físico dos sólidos dissolvidos, ou seja, converter o íon metálico solubilizado em uma espécie insolúvel e facilitar sua remoção por sedimentação e filtração (Recio, 2011).

Diante desta problemática existente entre a ingestão de alumínio presente na água e a saúde humana, torna-se necessário a remoção deste íon metálico por meio de técnicas eficientes que sejam preferencialmente de baixo custo e complexidade de operação, para viabilizar o tratamento em diversas realidades no país. Dessa forma, destaca-se a técnica convencional de precipitação química de íons metálicos em meio a utilização de hidróxido de cálcio. O objetivo

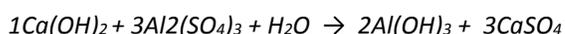
principal desse trabalho foi estudar a remoção do íon metálico Al^{3+} presente em água destinada para abastecimento, utilizando o Hidróxido de Cálcio como agente coagulante, devido a alta disponibilidade, baixo custo e complexidade do mesmo.

Materiais e Métodos

A parte experimental da pesquisa foi dividida com base na preparação do reagente $Ca(OH)_2$ e água de estudo e nos ensaios em Reatores Estáticos (Jarteste), o qual inclui a obtenção da curva de $Ca(OH)_2$ x pH e ensaios de tratabilidade em escala laboratorial. A água de estudo foi proveniente de soluções sintéticas de alumínio preparadas em laboratório por diluição.

Os ensaios de tratabilidade foram realizados avaliando duas tecnologias de tratamento: a filtração direta e o tratamento convencional (ciclo completo), todas utilizando a precipitação química. Todos os dados foram plotados e organizados em tabelas e gráficos.

A fórmula básica balanceada da aplicabilidade do projeto pode ser verificada a seguir:



Equação 1

Preparação do Reagente Hidróxido de Cálcio - $Ca(OH)_2$

O hidróxido de cálcio possui fórmula molecular $Ca(OH)_2$ com densidade de $2.211g/cm^3$ e $0.185g/cm^3$ de solubilidade em água. Para a realização dos ensaios utilizou-se a cal hidratada fornecida pela empresa Quallical, que é um produto comercial amplamente utilizado em estações de tratamento de água.

A partir do fornecimento do hidróxido de cálcio, utilizou-se a concentração de 0.5% de Hidróxido de cálcio em um volume de 500 mL de água destilada por meio de diluição, uma vez que esta é a concentração ideal para a maior eficiência na remoção.

Obtenção da Água de Estudo

Para a realização dos ensaios, foi preparada uma solução sintética com 0.75 mg/L de alumínio presente na água. A escolha desta concentração levou em conta os seguintes requisitos:

- Possuir concentração superior a 0.2 mg/L, valor máximo presente –VMP preconizado pela portaria 2,914/2011;
- Estar dentro do limite da faixa de leitura de Alumínio do espectrofotômetro Dr 5000, que por sua vez é de 0.008-0.8mg/L.

Na preparação da água de estudo, foi usado o sulfato de alumínio granulado $Al_2(SO_4)_3$ (produto comercial utilizado em estações de tratamento de água) com 14% de alumínio disponível. A água de estudo foi preparada então diluindo o sulfato de alumínio em 20 litros de água destilada, até se obter a concentração almejada de 0.75 mg/L de alumínio em água.

Ensaio em Jarreste

O procedimento inicial que antecede aos ensaios em Jarreste são as análises de qualidade da água em relação a concentração de alumínio e pH da água preparada. As análises de pH e concentração de alumínio foram realizadas de acordo com técnicas e equipamentos amplamente utilizados nas empresas de saneamento e laboratórios de pesquisa, como segue na Tabela 1.

Tabela 1. Materiais e métodos utilizados para a análise de pH e alumínio total da água de estudo.

Parâmetro	Equipamento	Marca/Modelo	Método	Referência
pH	pHmetro	HANA HI 8424	Eletrométrico	APHA (2005)
Alumínio Total	Espectrofotômetro UV/Visível	HACH Dr 5000	Espectrofotometria	APHA (2005)

A condução do experimento propriamente dito, foi realizada em escala laboratorial com a utilização de equipamento Jarreste da marca *Policontrol* para as simulações das tecnologias de tratamento de filtração direta e tratamento convencional (ciclo completo) e obtenção das condições ótimas de pH e dosagem de hidróxido de cálcio por meio da curva de dosagem de $\text{Ca(OH)}_2 \times \text{pH}$.

Curva de Dosagem de $\text{Ca(OH)}_2 \times \text{pH}$

O primeiro ensaio realizado em Jarreste foi dado com o objetivo de obter a curva de variação de pH, a partir das diferentes dosagens de Ca(OH)_2 , a fim de verificar o comportamento de variação do pH. Como o Jarreste em questão só dispõem de 4 jarros em pleno funcionamento, foi feito dois Jarreste, obtendo desta forma 8 pontos de variação.

O procedimento baseou-se na adição uniforme de 8 L da água preparada nos 4 jarros, distribuindo igualmente 2l em cada jarro por meio de proveta de 2000 mL devidamente lavada. Por conseguinte, realizou-se a adição do Ca(OH)_2 nos tubos próprios do Jarreste, em observação a concentração, pois 1ml da solução de Ca(OH)_2 a 0.5% corresponde à 5 mg/L. Para o jarro de 2l do equipamento, 1 ml da solução equivale a 2.5 mg/L. Portanto, foi realizada a regra de correspondência, encontrando as quantidades exatas adicionadas por meio de pipeta volumétrica.

O ensaio do Jarreste para obtenção da curva de pH foi conduzido de acordo com as seguintes condições, que por sua vez, são iguais as condições utilizadas para condução dos ensaios por tratamento de ciclo completo:

- Gradiente de velocidade na mistura rápida: 400 s^{-1}
- Dosagem do coagulante Ca(OH)_2 : 0, 2, 4, 6, 8, 10, 12 e 14 mg/L
- Tempo de mistura rápida: 30 s
- Gradiente de Floculação: 60 s^{-1}
- Tempo de Floculação: 30 minutos

Logo após os 30 segundos de mistura rápida, foi realizado a coleta nos jarros, e imediatamente encaminhadas para a leitura de pH.

Ensaio de Tratabilidade com Tratamento Convencional

O tratamento convencional (ciclo completo) foi baseado na simulação das unidades de coagulação, floculação e sedimentação em Jarreste. O procedimento metodológico inicial foi dado a partir da medição da concentração de alumínio e pH da água preparada por meio de pHmetro e Espectrofotômetro, respectivamente. Teoricamente, a concentração da água preparada é a mesma encontrada nos cálculos estequiométricos, porém, deve-se realizar esta averiguação inicial devido a possíveis variáveis aleatórias que ocorrem na prática.

As condições dos ensaios de tratamento convencional no Jarreste foram as seguintes:

- Gradiente de velocidade na mistura rápida: 400 s^{-1}
- Dosagem do coagulante Ca(OH)_2 : 0, 2, 4, 6, 8, 10, 12 e 14 mg/L
- Tempo de mistura rápida: 30 s
- Gradientes de velocidade na mistura lenta: 30 e 60 s^{-1}
- Tempo de mistura lenta: 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40 min

Foram realizados 2 ensaios distintos para suprir toda a variação das condições citadas acima. Vale ressaltar que como a capacidade do Jarreste é de 4 provas ou jarros, foram necessários 2 Jarreste para atender a variação da dosagem do coagulante (8 concentrações distintas), ou seja, em cada ensaio, há dois Jarreste ou oito provas.

Ensaio 1

O objetivo deste ensaio foi verificar a melhor dosagem de alumínio em consonância a curva de Ca(OH)_2 x pH e o comportamento de remoção de alumínio.

Para a condução do primeiro ensaio, foram necessários dois Jarreste ou sub-ensaios para compor todo o intervalo de variação da dosagem no gradiente de velocidade de mistura lenta igual à 60 s^{-1} . Foi preenchido os 2 L de água preparada em cada Jarro e adicionado as dosagens de 0, 2, 4 e 6 mg/L de Ca(OH)_2 nos tubos de espera para o primeiro Jarreste.

Logo em seguida, procedeu-se da mesma forma com as dosagens de 8, 10,12 e 14 mg/L de Ca(OH)_2 para o segundo Jarreste deste ensaio.

A fase de coagulação foi realizada em meio de mistura rápida, ou seja, no gradiente de velocidade de 400s^{-1} por 30 s, em que o Ca(OH)_2 desestabiliza o meio com o aumento de pH, ocorrendo a formação dos coágulos e consequente precipitação. Por conseguinte, o gradiente de velocidade foi reduzido para 30s^{-1} e 60s^{-1} por 20 min nos ensaios 1 e 2, para a simulação da mistura lenta, propiciando o desenvolvimento dos flocos na água na floculação. Neste momento foi realizada a coleta simultânea nos jarros por meio de recipientes de plástico devidamente marcados para a leitura imediata de pH. Após a formação dos flocos, as hastes dos jarros de mistura foram desligadas e ocorre a deposição dos flocos no fundo dos jarros por ação da gravidade por 5 min, simulando a unidade de sedimentação.

Corridos os 5 min de sedimentação, foi realizada a coleta simultânea por meio das mangueiras de saída do Jarreste. Coletou-se 100 mL da água tratada em beakers devidamente marcados, cada qual correspondendo a um jarro.

Ensaio 2

Neste segundo ensaio, o objetivo foi verificar o comportamento da remoção de alumínio a partir da redução do gradiente de mistura lenta e da variação consecutiva do tempo de mistura lenta. Utilizou-se a melhor dosagem de Ca(OH)_2 encontrada no ensaio anterior.

Para a condução do segundo ensaio, foram necessários dois Jarreste ou sub-ensaios para compor 8 pontos. Diferentemente do primeiro ensaio, foi realizada a floculação em diferentes intervalos de tempo, variando de 5 a 40 min. Utilizou-se a melhor dosagem do ensaio anterior no gradiente de velocidade de mistura lenta igual à 30s^{-1} . O procedimento de análise seguiu-se de acordo com o ensaio anterior.

Ensaio de Tratabilidade com Filtração Direta

Após as análises preliminares de pH e alumínio total presente na água preparada, a água foi encaminhada para os ensaios de filtração direta em Jarreste com a utilização de papeis de filtros qualitativo da marca *Qualy*, dispostos em funis com coleta simultânea das 4 provas. De acordo com a VWR, (2011), estes papeis de filtros de celulose são comumente usados em técnicas analíticas qualitativas com filtração relativamente rápida e retenção de precipitados gelatinosos como o hidróxido férrico e o hidróxido de alumínio.

As especificações técnicas da membrana filtrante utilizada podem ser verificada na Tabela 2 a seguir:

Tabela 2. Especificação técnica do papeis de filtros qualitativo da marca *Qualy*.

Propriedade	Unidade	Valor
Gramatura	g/m ²	80
Espessura	µm	205
Cinza	%	0.5
Maioria dos Poros	µm	14
Permeabilidade ao ar	L/s.m ²	14

A técnica de remoção é baseada na formação de coágulos de pequena dimensão a partir da precipitação química do alumínio com o hidróxido de cálcio na etapa de coagulação ou mistura rápida nos jarros de 2 L. Os parâmetros condicionantes do ensaio foram os seguintes:

- Gradiente de velocidade da mistura rápida: 400 s⁻¹
- Dosagem do coagulante Ca(OH)₂: 0, 2, 4, 6, 8, 10, 12 e 14 mg/L
- Tempo de mistura rápida (coagulação): 30 s
- Gradiente de velocidade na filtração: 150s⁻¹
- Tempo de filtração nos papeis de filtros: 20 min

Os valores dos parâmetros condicionantes do ensaio foram determinados com base nos valores utilizados por Di Bernado *et al.*, (2011).

A condução do ensaio no Jarteste foi iniciada com a esquematização da estrutura necessária para a filtração e coleta da água filtrada em recipiente adequado, já que o Jarteste utilizado não contém essa estrutura secundária. Desta forma, foram utilizados erlenmeyers de 2 litros apoiados individualmente em uma cadeira. Acoplados a estes erlenmeyers, continha os funis simples de vidro com duplo papel de filtro inscrito no mesmo para receber a água proveniente das mangueiras de saída do Jarteste. As mangueiras de saída do Jarteste possuem diâmetro interno e externo de 0.5 cm e 0.8 cm, respectivamente.

Foi realizado apenas 2 provas por ensaio, para melhor monitoramento e controle da filtração direta, uma vez que foi utilizado uma estrutura diferenciada de apoio que havia certa restrição de espaço. Em cada cadeira, foi apoiado somente 1 prova de coleta (erlenmayer), que por sua vez, se encontrava a 59 cm do piso. Os papéis de filtro foram devidamente dobrados e inseridos no funil simples de vidro um em cima do outro, simulando uma dupla camada de membrana de filtração.

A simulação descrita indica sumariamente que o meio filtrante de dupla camada produz aproximadamente o dobro de água tratada do que o meio filtrante de camada simples, considerando-se a mesma qualidade para a água tratada a ser obtida bem como parâmetros operacionais (Abreu, Brincke Ferreira, 2009).

Maiores taxas de filtração, como no caso da camada dupla, implicam a obtenção de maiores volumes de água tratada por unidade de filtração da ETA, o que pode levar à redução da área a ser construída para filtros novos, reduzindo com isso os custos da construção da ETA, ou à ampliação da capacidade de tratamento da ETA, produzindo mais água tratada em uma mesma unidade operacional. Entretanto, deve-se atentar aos materiais e os meios utilizados para filtração, pois em condições normais com utilização de antracito, areia e seixo para a dupla camada, a carreira de filtração torna-se 1.5 vezes maior que a carreira de filtração de camada simples. Porém, verifica-se que ainda torna-se viável, se o sistema for devidamente dimensionado e implantado (Di Bernardo *et. al.*, 2005).

Depois de ajustado os filtros, procedeu-se a averiguação da inclinação adequada das mangueiras de saída da água para o filtro, uma vez que quanto maior a inclinação, maior seria a vazão, chegando ao limite de 12.85 mL/s para cada mangueira para a inclinação de 180°. Foram feitos 3 testes de inclinação com 60°, 90° e 120° onde somente com 60° foi possível a condução do ensaio, já que com a taxa de aplicação correspondente aos 90° e 120° visivelmente danificava o filtro em apenas 5 minutos. A taxa de aplicação utilizada foi constante e igual à 0.9 ml/s correspondente a inclinação de 60° da mangueira.

Por conseguinte, iniciou-se o ensaio propriamente dito a partir da fixação dos parâmetros condicionantes citados anteriormente. Foram realizados 4 ensaios Jarrest, sendo que em cada ensaio, apenas 2 provas, totalizando 8 pontos para compor a curva de remoção de alumínio com hidróxido de cálcio. Em cada ponto, foi variado somente a dosagem do hidróxido de cálcio, fixando todos os outros parâmetros intervenientes. Vale ressaltar que a medição de pH nestes ensaios procedeu-se seguindo o mesmo procedimento metodológico realizado em todos os ensaios, ou seja, logo após a mistura rápida, com coleta simultânea em recipientes de plástico devidamente marcados, e feito a leitura imediatamente em seguida no pHmetro.

Resultado e Discussão

A apresentação dos resultados seguem de acordo com a ordem de condução dos ensaios laboratoriais, sendo dividido na obtenção da curva de dosagem de $\text{Ca(OH)}_2 \times \text{pH}$, nos ensaios de tratabilidade com tratamento convencional e filtração direta e no Comparativo das tecnologias em termos de remoção de Al. Cabe ressaltar que a preparação da solução sintética de alumínio (água de estudo) foi seguida de acordo com a metodologia apresentada anteriormente com concentração fixa de 0.75 mg/L, porém, na prática, as concentrações encontradas sofreram ligeira variação devido a impossibilidade de realizar ensaios exatamente iguais.

Curva de Dosagem de $\text{Ca(OH)}_2 \times \text{pH}$

A Tabela 3 e a Figura 1 apresentam os resultados obtidos da curva de dosagem de hidróxido de cálcio e pH. Verificou-se que a disposição dos dados ocorreram conforme previsto na hipótese

inicial do trabalho, ou seja, de remoção de alumínio por meio de precipitação com o aumento do pH. A partir do levantamento dos dados, é possível então verificar que quanto maior a dosagem de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, maior será o pH da amostra.

Ajustando os dados em uma equação linear de 1° grau, obteve-se um coeficiente de ajustamento R^2 de 0.923, podendo ser útil para estimativas de pH em variadas dosagens de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ observando as condições de ensaio desse trabalho. A equação ajustada pode ser visualizada a seguir:

$$y = 0.3254x + 7.4323$$

Equação 2

Tabela 3. Curva de pH de acordo com a variação da dosagem de $\text{Ca}(\text{OH})_2$

Dosagem de Cal		pH
Concentração (mg/L)	Quantidade (mL)	
0	0	6.73
2	0.8	8.41
4	1.6	9.01
6	2.4	9.21
8	3.2	10.523
10	4	11.120
12	4.8	11.279
14	5.6	11.398

As espécies de alumínio em meio aquoso são dependentes do pH do meio. A espécie solúvel aluminato, $\text{Al}(\text{OH})_4^-$, é predominante em pH acima de 9, sendo a única espécie presente em pH acima de 10. Portanto, nas condições de adição de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ acima de 4 mg/L nas condições deste projeto, restará apenas a espécie solúvel aluminato, $\text{Al}(\text{OH})_4^-$.

Cabe ressaltar que de acordo com a portaria 2,914/2011 do Ministério da Saúde, recomenda-se que para o padrão de potabilidade de água, o parâmetro pH deve estar na faixa de 6.0-9.5.

Por meio da análise e interpretação da Figura 1, pode-se sugerir a utilização de concentração de 6 à 6.35 mg/L de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ a 0.5%, a fim de encontrar um pH entre 9.21 a 9.5, ou seja, as melhores condições de dosagem de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ dentro da faixa recomendada pela portaria 2914/2011 do Ministério da Saúde.

Verifica-se ainda que o pH da água de estudo é ligeiramente ácido, encontrando o valor de 6.73. Enquanto que a inclinação da reta de regressão linear para os dados é positiva, crescente e igual à 0.3253.

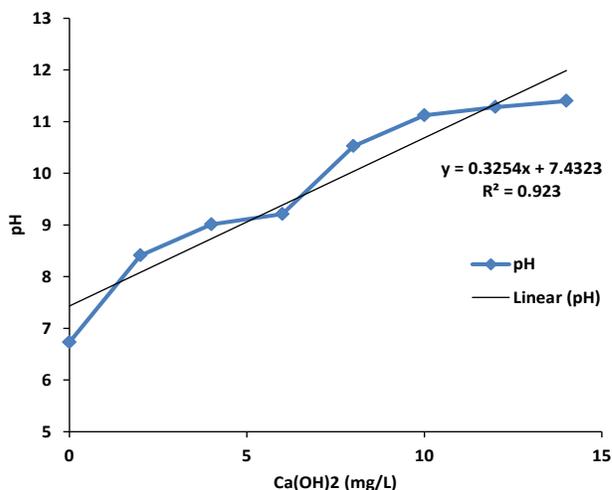


Figura 1. Arranjo dos dados de pH a partir da variação da Dosagem de Ca(OH)_2 na água de estudo

Ensaio de Tratabilidade com Tratamento Convencional

Ensaio 1

O objetivo deste ensaio foi verificar a melhor dosagem de alumínio em consonância a curva de $\text{Ca(OH)}_2 \times \text{pH}$ e o comportamento de remoção de alumínio. A tabela 4 a seguir apresenta os dois Jarreste realizados nas condições preconizadas para o ensaio 1:

Tabela 4. Curva de pH e remoção de Al de acordo com a variação da dosagem de Ca(OH)_2 com água preparada na concentração de 0.802 mg/L

Jarro	Dosagem de Cal		pH	Al (mg/L)
	Concentração (mg/L)	Quantidade (ml)		
1	0	0	6.93	0.7650
2	2	0.8	8.25	0.6780
3	4	1.6	9.04	0.3290
4	6	2.4	9.29	0.2650
1	8	3.2	10.645	0.0665
2	10	4	11.315	<0.0080
3	12	4.8	11.421	<0.0080
4	14	5.6	11.532	<0.0080

Neste primeiro ensaio, a concentração encontrada da solução sintética de alumínio (água de estudo) foi de 0.802 mg/L, mostrando uma variação na concentração teórica almejada de 0.75 mg/L. Essa diferença já era prevista, dando inclusive a justificativa para a escolha da concentração de 0.75 mg/L. Porém, o valor encontrado torna-se mais atraente para a condução do experimento, já que demanda maior capacidade de remoção.

Analisando a

Tabela 4, pode-se constatar a remoção ideal somente com dosagem de Ca(OH)_2 entre 6 e 8 mg/L para atingir o limite máximo de 0.200 mg/L de Al em água para abastecimento. Por meio da utilização da equação linear ajustada, verifica-se que para encontrar a concentração de 0.200 mg/L, o pH será de aproximadamente 10.08, estando acima do preconizado, indicando desta forma baixa eficiência na remoção.

Na Figura 2 apresentada a seguir, pode ser verificado o arranjo dos dados de remoção de alumínio a partir do aumento da dosagem de Ca(OH)_2 e conseqüente aumento de pH.

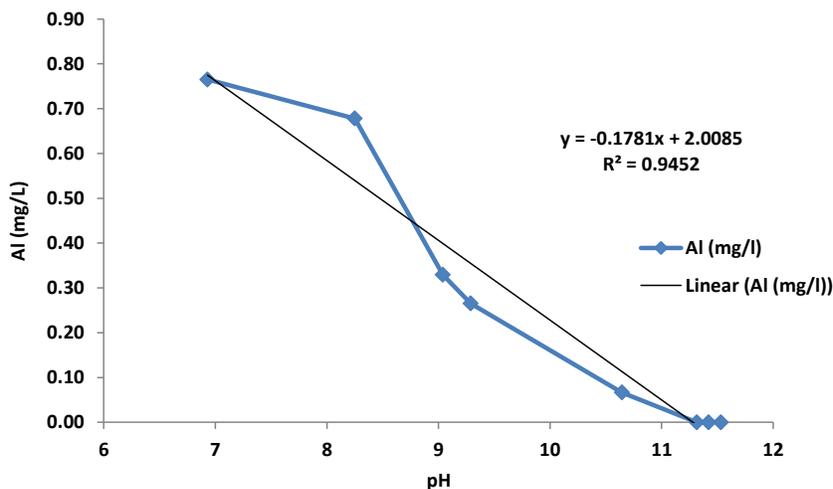


Figura 2. Arranjo dos dados da concentração de Al a partir da variação da Dosagem de Ca(OH)_2 e conseqüente pH no ensaio 1

Na Figura 2 pode ser verificado que a inclinação dos dados foi de -0.1837, ou seja, a remoção foi positiva, porém, com a alta necessidade de elevação de pH. É interessante observar que mesmo sem a adição do Ca(OH)_2 , há uma pequena remoção de 0.037 mg/L de Al devido a mistura rápida propiciar a aglutinação de algumas partículas, que em seguida vencem a gravidade e sedimentam.

Ensaio 2

Neste segundo ensaio, o objetivo foi verificar o comportamento da remoção de alumínio a partir da redução do gradiente de mistura lenta para $30s^{-1}$ e da variação consecutiva do tempo de mistura lenta de 5 a 40 min. Utilizou-se a melhor dosagem de $Ca(OH)_2$ encontrada no ensaio anterior, ou seja, 8 mg/L de Cal.

Neste segundo ensaio, a concentração encontrada da solução sintética de alumínio (água de estudo) foi de 0.83 mg/L.

A partir da análise e interpretação da tabela acima (Tabela 5), verifica-se que a redução do gradiente de velocidade da mistura lenta (floculação) reduz a eficiência de remoção de Al em água. Utilizando como base o Tempo de floculação igual à 20 min, é possível comparar em mesmas condições de dosagem igual à 3.2 mg/L que no ensaio anterior (ensaio 1) a concentração de Alumínio remanescente foi de 0.0665 mg/L, enquanto neste ensaio obteve-se 0.507 mg/L, estando fora do limite preconizado pela portaria 2,914/2011 de 0.200 mg/L.

Tabela 5. Curva de pH e remoção de Al de acordo com a variação do tempo de floculação e gradiente de velocidade

Jarro	Dosagem de Cal (mg/L)		T. floculação	pH	Al (mg/L)
	Concentração	Quantidade			
1	8	3.2	5	10.68	0.732
2	8	3.2	10	10.45	0.71
3	8	3.2	15	10.38	0.615
4	8	3.2	20	10.42	0.507
1	8	3.2	25	10.51	0.449
2	8	3.2	30	10.36	0.372
3	8	3.2	35	10.64	0.295
4	8	3.2	40	10.47	0.218

Na Figura 3 apresentada a seguir, pode ser verificado o arranjo dos dados de remoção de alumínio a partir da variação do tempo de floculação, utilizando a dosagem de cal fixa e igual à 8 mg/L.

Em relação ao ajuste, estes dados foram os que melhor se ajustaram a função de 1° grau, com R^2 de 0.9919 e inclinação de -0.0154. Podendo ser corretamente interpolado concentrações a partir de variados Tempos de Floculação. Porém, a redução do gradiente de velocidade na mistura lenta mostrou-se inviável nestas condições não conseguindo alcançar concentrações inferiores à 0.200 mg/L.

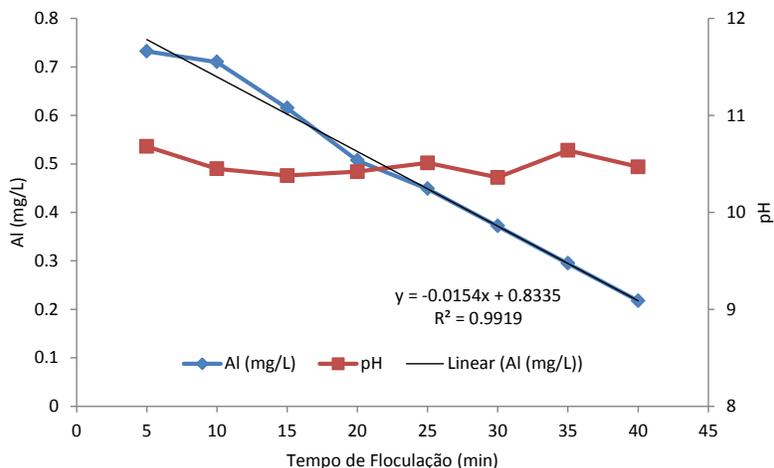


Figura 3. Arranjo dos dados da concentração de Al a partir da variação do tempo de floculação no ensaio 2

Em relação ao ajuste, estes dados foram os que melhor se ajustaram a função de 1º grau, com R^2 de 0.9919 e inclinação de -0.0154. Podendo ser corretamente interpolado concentrações a partir de variados Tempos de Floculação. Porém, a redução do gradiente de velocidade na mistura lenta mostrou-se inviável nestas condições não conseguindo alcançar concentrações inferiores à 0.200 mg/L.

Ensaio de Tratabilidade com Filtração Direta

Os ensaios de tratabilidade com filtração direta se mostraram superiores aos ensaios com tratamento convencional em termos de eficiência de remoção de Al.

A partir da Tabela 6, verifica-se que a dosagem de apenas 2 mg/L de Cal é suficiente para a remoção de Al na água a níveis aceitáveis pela portaria 2,914/2011 e atendimento a faixa de pH recomendada de 6.0-9.5.

Por meio da análise e interpretação da Figura 4, verifica-se que o ponto ideal de remoção de Al encontra-se na concentração de 6 mg/L de Ca(OH)_2 , atingindo pH correspondente de 9.24, ou seja, dentro da faixa recomendada.

É importante salientar que a remoção de Al só é realizada de forma eficiente por meio da adição da Ca(OH)_2 seguido da filtração direta. Pois como pode ser visualizado na tabela 6, sem a adição de Ca(OH)_2 , a concentração de alumínio remanescente foi de 0.6900, não havendo portanto remoção significativa somente com o filtro.

Tabela 6. Curva de pH e remoção de Al de acordo com a variação da dosagem de Ca(OH)_2 com água preparada na concentração de 0.816 mg/L

Ensaio	Jarro	Dosagem de Cal (mg/L)		pH	Al (mg/L)
		Concentração	Quantidade		
1	1	0	0	6.82	0.6900
	2	2	0.8	7.93	0.1790
2	1	4	1.6	8.81	0.1120
	2	6	2.4	9.24	0.0700
3	1	8	3.2	10.26	0.1030
	2	10	4	10.68	<0.008
4	1	12	4.8	11.02	<0.008
	2	14	5.6	11.04	<0.008

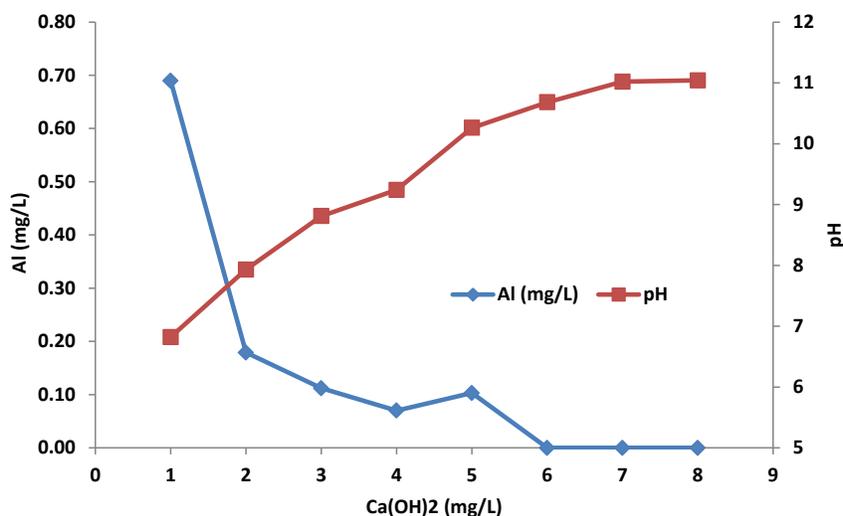


Figura 4. Arranjo dos dados da concentração de Al a partir da variação da Dosagem de Ca(OH)_2 e conseqüente pH.

Comparativo das Tecnologias em Termos de Remoção de Al

Para efeito de comparação, foi utilizado o ensaio 1 da tecnologia de tratamento convencional, uma vez que este ensaio foi o que obteve os melhores resultados nesta tecnologia. Vale lembrar que a concentração da água preparada no ensaio 1 foi de 0.802 mg/L de Al.

Já na tecnologia de filtração direta, a água preparada teve concentração de 0.816 mg/L, ou seja, a tecnologia de tratamento convencional teve uma pequena vantagem de ter concentração 0.014 mg/L de Al a menos que a tecnologia de filtração direta.

A partir da análise e interpretação da Tabela 7 e da Figura 5, pode-se constatar que há maior eficiência na remoção de alumínio na tecnologia de filtração direta. A dosagem de apenas 2 mg/L é suficiente para alcançar os níveis aceitáveis pela legislação em termos de alumínio e pH. Enquanto que na tecnologia de tratamento convencional é necessário a dosagem de pouco mais de 6 mg/L de Ca(OH)_2 para alcançar resultados semelhantes, estando mesmo assim com pH fora da faixa recomendada.

Tabela 7. Comparativo de remoção de Al com mesma dosagem de Ca(OH)_2 entre as tecnologias de tratamento convencional e filtração direta

Dosagem de Cal	Al (mg/L) T.C*	Al (mg/L) F.D**	Al (mg/L) T.C-F.D
0	0.7650	0.6900	0.0750
2	0.6780	0.1790	0.4990
4	0.3290	0.1120	0.2170
6	0.2650	0.0700	0.1950
8	0.0665	0.1030	-0.0365
10	<0.008	<0.008	0.00
12	<0.008	<0.008	0.00
14	<0.008	<0.008	0.00

*Tecnologia de Ciclo Completo

**Tecnologia de Filtração Direta

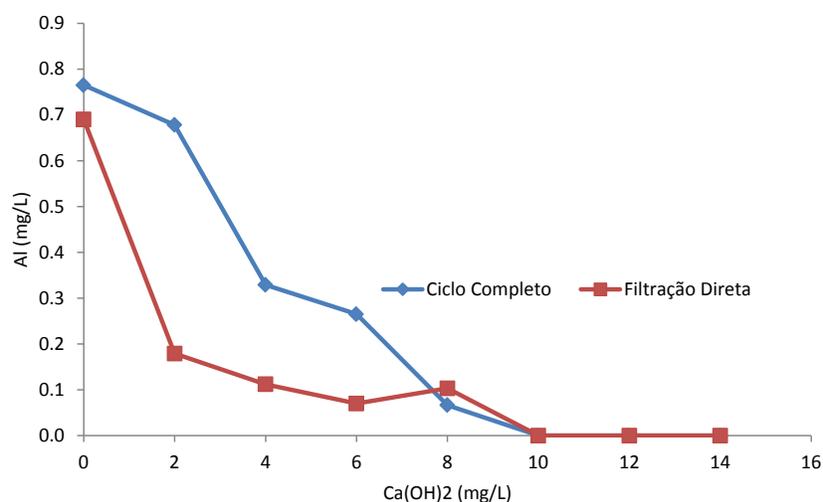


Figura 5. Comparativo de remoção de Al com mesma dosagem de Ca(OH)_2 entre as tecnologias de tratamento convencional e filtração direta.

Verifica-se que apenas na dosagem de 8 mg/L de Al, a tecnologia de tratamento convencional conseguiu superar a tecnologia de filtração direta, removendo exatamente 0.0365 mg/L a mais que a tecnologia citada. Com dosagens superiores a 8 mg/L, o espectrofotômetro não consegue detectar a concentração remanescente Al na amostra, uma vez que esta está abaixo de 0.008 mg/L.

Na Figura 5 pode ser verificado o arranjo dos dados de remoção de alumínio em ambas as tecnologias, a partir do mesmo aumento da dosagem de Ca(OH)_2 nas águas de estudo preparadas.

Conclusões

A tratabilidade de águas com alto teor de Alumínio – Al^{+3} pode ser realizada com a adição de hidróxido de Cálcio como agente coagulante, que ao aumentar o pH, acarreta a precipitação química do alumínio pela formação de precipitado gelatinoso de hidróxido de alumínio.

As melhores às condições de remoção de alumínio realmente estão em pH mais elevados. Porém deve-se atentar a faixa de pH recomendada pelo ministério da saúde de 6.0 à 9.5 sendo portanto um dos quesitos observados na pesquisa.

Em relação as condições de operação da tecnologia de tratamento convencional, foi possível constatar que a redução do gradiente de velocidade da mistura lenta reduz consequentemente a eficiência de remoção de Al^{+3} em água. Entretanto, com o aumento do tempo da mistura lenta ou floculação, tem-se maior remoção de Al^{+3} , embora não chegando a entrar em conformidade com o limite máximo de 0.200 mg/L preconizado.

Em relação a tecnologia de filtração direta, constatou-se remoção de Al^{+3} à níveis aceitáveis com dosagem de apenas 2 mg/L, mostrando-se extremamente promissor para aplicação em escala real.

Para atender os níveis preconizadas pela portaria 2914/2011 do ministério da saúde, ou seja, abaixo de 0.200 mg/L de Al em água para abastecimento e pH entre 6.0-9.5, deve-se optar pela precipitação química com Ca(OH)_2 na tecnologia de filtração direta. A mesma mostrou-se superior a tecnologia de tratamento convencional em termos de remoção de alumínio.

Recomenda-se realizar demais estudos com águas provenientes de mananciais de captação e verificar possíveis interferências de outros poluentes na remoção de alumínio, além de possibilitar a provável remoção de ferro e manganês a partir da precipitação com o hidróxido de cálcio.

Recomenda-se realizar o estudo em escala piloto para aplicação em escala real com a utilização de hidróxido de cálcio para a remoção de alumínio na tecnologia de filtração direta.

Referências bibliográficas

- APHA, A.W. (2005) *Standard Methods for the examination of water and Wasterwater*, 21 st ed. American PublicHealthAssociation, Washington, D.C.
- Di Bernado, L., Dantas, A.D.B., Voltan, P.E.N. (2011) *Tratabilidade de água e dos resíduos gerados em estações de tratamento de água*. São Carlos -SP: LDiBe, 453 pp.
- Brasil (2011) Ministério da Saúde. Secretaria de Vigilância em Saúde, Departamento de Vigilância em Saúde Ambiental e Saúde do Trabalhador. *Portaria MS nº 2,914/2011: procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade*. Brasília: Ministério da Saúde, 52 pp. (Serie E. Legislação de Saúde).
- Devecchi, G.C.R., Ferreira, P.C., Abreu, K.A., Trevilato, T.M.B, Muñoz, S.I.S. (2006) *Níveis de Alumínio e Zinco em água coletada em dois municípios que possuem diferentes Fontes de captação e tratamento no estado de São Paulo*. *O Mundo da Saúde*, **30**(4), 619-627.
- Eckhardt, T.M., Schneider, B. (2009) *Edge states intermediate between laminar and turbulent dynamics in pipe flow*. *Philosophical Transactions Royal Society London*.
- Folzke, C.T. (2013) *Estudo da remoção de alumínio de água para abastecimento utilizando quitosana*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, Departamento de Engenharia Sanitária e ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 115 pp.
- Recio, M.A.L. (2011) *Aluminium in Waters. Sources, Speciation and Removal Techniques*. 4. ed. New York: Nova Science Publishers, Inc., v. 2, 235 pp.
- Marmos, J.L. (2009) Avaliação do Nível de Contaminação dos Aquíferos da Cidade de Parintins (AM). In: 2005 Workshop Internacional de Geologia Médica, Rio de Janeiro Serviço Geológico do Brasil - CPRM/MA. Parintins-Amazonas, 169-173.
- Rosalino, M.R.R. (2011) *Potenciais Efeitos da Presença de Alumínio na Água de Consumo Humano*. Dissertação de Mestrado Engenharia do Ambiente. Faculdade de Ciências e Tecnologia - Universidade Nova de Lisboa. Lisboa, 85 pp.
- Silva F.B.B., Silva, H.K.P., Schuler, A.R.P., Albuquerque, G.B. (2010) Estudo preliminar das concentrações de metais traço, em águas subterrâneas na região metropolitana do Recife - pernambuco de acordo com a portaria ms nº 518 /gm de 25 de março de 2004. *XVI Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas e XVII Encontro Nacional de Perfuradores de Poços*, Recife-PE, 1-12.