

I-375 - REMOÇÃO DE DUREZA TOTAL DE ÁGUA SUBTERRÂNEA POR MEIO DE UM REATOR DE RESINA DE TROCA CATIÔNICA FLUIDIZADA

Aquila Silva Levindo⁽¹⁾

Engenheiro Sanitarista e Ambiental pela Escola de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Goiás.

Guilherme Milhomem da Silva⁽²⁾

Engenheiro Sanitarista e Ambiental pela Escola de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Goiás.

Paulo Henrique Oliveira Marinho⁽³⁾

Engenheiro Sanitarista e Ambiental pela Escola de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Goiás. Mestrando PPGEAS – UFG.

Francisco Javier Cuba Teran⁽⁴⁾

Engenheiro Civil pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Mestre e Doutor em Hidráulica e Saneamento pela USP e Pós Doutor em Engenharia Urbana pela UFSCAR. Professor da Escola de Engenharia Civil e Ambiental da UFG.

Endereço⁽¹⁾: Rua 239, Setor Leste Universitário. Telefone: 62 98228-1586. E-mail: aquilalevindo.ea@gmail.com

Endereço⁽²⁾: Rodovia GO 080, Km 26, Nerópolis-GO. Telefone: 62 98460-2037. E-mail: guilhermemilhomem.ea@gmail.com

Endereço^(3,4): Avenida Universitária, Quadra 86, Setor Leste Universitário. Goiânia-GO. Telefone: 62 3209-6086. E-mail: marinho.pho@gmail.com e paco.ufg@gmail.com

RESUMO

A aplicação de resina de troca catiônica é um método alternativo de tratamento de efluentes e de água. As resinas poliméricas, as quais possuem características diferentes de acordo o material e granulometria, são utilizadas para o tratamento de efluentes industriais, para remoção de íons positivos e negativos, e para abrandamento no tratamento de água. No Estado de Goiás, a utilização desse material irá facilitar o tratamento de águas oriundas de poços profundos para abastecimento público que possuem elevada dureza. Nesse projeto construiu-se um reator de leito fluidificado operado por batelada no qual a resina tem maior superfície de contato com a amostra e pode operar em maior eficiência na remoção dos íons Ca^{2+} da água com dureza total elevada. O estudo do método constituiu-se da coleta de amostras de água subterrâneas, da produção de amostras sintéticas, da operação do reator fluidificado com resina de troca catiônica, e da verificação da quantidade de dureza total através do método titulométrico EDTA. Após a análise dos resultados obtidos das amostras tratadas pela resina concluiu-se que o reator construído é eficiente, uma vez que foi verificado remoção de dureza total da água coletada e sintetizada em valores de 75 a 99%.

PALAVRAS-CHAVE: Dureza Total, Resina Catiônica, Reator Fluidificado, Águas de abastecimento.

INTRODUÇÃO

Dentre muitos fatores, o fornecimento de água potável de um município ou região depende da qualidade da água fornecida, que deve estar em conformidade com às diretrizes e aos parâmetros físico-químicos estabelecidos pelas legislações vigentes. A água potável ao chegar à torneira do consumidor deve respeitar os limites máximos e as concentrações mínimas dos diversos parâmetros físico-químicos e biológicos estabelecidos por essas normas. De maneira geral, no Brasil, a Portaria do Ministério da Saúde 2.914 de 2011, juntamente com as legislações estaduais e municipais, são responsáveis pelo estabelecimento dos padrões de potabilidade da água. Esses padrões, ou limites, existem para garantir a potabilidade da água, nos diversos sistemas de tratamento existentes e vão desde a desinfecção até a adequação de características estéticas do manancial.

Nesse contexto, conforme Pena (2015), destacam-se as águas subterrâneas, por apresentarem uma qualidade da água geralmente superior às águas superficiais, reservas abundantes e uma menor necessidade de transporte em

alguns casos, o que minimiza custos no processo de tratamento. As águas subterrâneas estão classificadas de acordo com a Resolução CONAMA 396 de 2008 como classes especial, 1, 2, 3, 4 e 5. A mesma resolução 396 estabelece os padrões de qualidade das águas subterrâneas e dispõe sobre as diretrizes para prevenção e controle da poluição de tais águas.

A água subterrânea possui um papel crucial para o abastecimento público de água, de fato, desde 1950, a captação de água subterrânea cresceu bastante para suprir as necessidades de água da população (SILVA *et al*, 2006). Contudo, a contaminação da água subterrânea, mesmo sendo menos vulnerável do que a água superficial, é, geralmente, de cara e complicada descontaminação (FERREIRA *et al*, 2009). Diversos parâmetros alteraram a qualidade da água subterrânea, e nesse sentido, Dias *et al* (2007) pontua que um dos principais parâmetros para a indicação da qualidade da água subterrânea é a dureza total.

Em função da concentração em que se apresenta, a dureza total, representada pela somatória das concentrações dos íons Cálcio e Magnésio, pode representar um problema no processo de distribuição de água potável. Ainda que a água distribuída esteja em conformidade com o padrão de potabilidade das leis vigentes, a dureza total elevada causa problemas nas tubulações, no sabor, e na eficiência da água como solvente. Um exemplo, apontado por Silva (2011), é que em alguns aquíferos na Chapada do Apodi, Ceará, a água subterrânea caracteriza-se pela grande presença de calcário e arenito, características da bacia hidrográfica a qual estão inseridos, provocando altos valores de íons carbonatos, os quais são frequentemente encontrados ligados ao Cálcio, formando o carbonato de cálcio, ocasionando problemas operacionais no abastecimento, como incrustações nas tubulações.

Mourão (2009) acentua que o aumento do uso de águas subterrâneas tem crescido exponencialmente no Brasil, principalmente em cidades grandes e locais onde há intensa atividade agrícola, destacando então Goiás, um estado com grande parte da economia dependente da agropecuária.

A busca por uma maior eficiência de tratamento e viabilidade econômica, o uso de resinas iônicas como métodos alternativos no tratamento de água tem se destacado. Resinas poliméricas já são utilizadas como componentes alternativos ao uso do carvão ativado no tratamento de água para a remoção de compostos orgânicos (QUEIROS *et al*, 2006). Estudos realizados na Universidade de São Paulo em 2004 concluíram que com o uso de resinas de troca iônica aplicadas em colunas obtém-se águas de alta qualidade, destacando o fato de as resinas possuírem maior facilidade na operação, possibilidade de regeneração e elevada pureza (TAVARES *et al*, 2004). Além disso, Teixeira *et al* (2004) destacou em suas pesquisas o estudo de resinas poliméricas para o tratamento de efluentes com presença de chumbo, um metal nocivo à saúde humana. De fato, a autora conclui que a efetividade do uso de resinas principalmente na remoção de íons específicos, nessa pesquisa o íon chumbo II, é bastante eficaz.

A Empresa Saneamento de Goiás S/A (SANEAGO) é a prestadora de serviços na área de abastecimento de água e esgotamento sanitário para aproximadamente 84 % da população urbana do Estado de Goiás, conforme apresentado no próprio portal eletrônico da concessionária. Esta empresa é responsável desde a escolha das metodologias a serem utilizadas até a operação dos sistemas públicos de abastecimento, optando por soluções que sejam técnica e economicamente viáveis.

Em Goiás, a opção por captação de água subterrânea tem se tornado comum devido à qualidade da água ser usualmente superior à qualidade encontrada superficialmente, com efeito, necessitando um menor custo no tratamento. Contudo, alguns sistemas possuem como obstáculo à sua implantação uma elevada dureza, devido às características do solo em que o poço é perfurado. Celligoi (1999) aponta que o íon Cálcio forma, através de suas ligações com outros elementos, depósitos de calcita, aragonita, carbonatos e dolomita, pois o Cálcio é o íon mais comum encontrado em águas subterrâneas e o íon Magnésio mesmo em menor abundância possui grande solubilidade com a água. Portanto, uma elevada dureza acaba ocasionando que a operação seja inviabilizada devido ao investimento necessário para a remoção da dureza total ou abrandamento do afluente. Diante de um cenário, em que a dureza total acima de 150 mg CaCO₃.L⁻¹ não é aceita pelos consumidores, fica evidente a necessidade de encontrar metodologias alternativas para remoção de dureza de águas subterrâneas destinadas ao abastecimento público.

OBJETIVOS

Diante do exposto, este trabalho teve como objetivo verificar a eficiência de uma resina catiônica na remoção de dureza de água oriunda de mananciais subterrâneos visando o abastecimento público, assim como determinar o tempo de esgotamento da capacidade de troca iônica.

MATERIAIS E MÉTODOS

AFLUENTE AO SISTEMA

A eficiência do sistema na remoção de dureza foi avaliada com água retirada do subsolo e água com dureza variável preparada em laboratório. Para a operação do sistema com água subterrânea, foi necessária a seleção de uma água que contenha a maior dureza possível e o mínimo de interferência de outros elementos, tais como ferro ou sódio, pois estes íons poderiam ser removidos no tratamento, interferindo na capacidade de esgotamento da resina e alterando o resultado final do processo.

A água subterrânea foi retirada de um poço perfurado em aquífero confinado, com 88 metros de profundidade e um diâmetro útil de 6 polegadas, sendo jorrante. A vazão era considerada adequada para o abastecimento do município, porém a água apresentava dureza de 186 mg $\text{CaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$.

Com o propósito de obter afluentes sintéticos com dureza total de 500, 400, 300, 200 e 100 mg $\text{CaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$, uma solução de CaCO_3 com concentração de 5 g L^{-1} foi diluída em água destilada de forma a produzir alíquotas com as concentrações especificadas na Tabela 1.

Tabela 1: Identificação dos afluentes sintéticos e valores de dureza Total.

Identificação	Volume utilizado Solução CaCO_3 (mL)	Dureza Titulada (ml EDTA)	Dureza Total Inicial (mg/L)
100	20	2.5	50
200	40	8	160
300	60	14.5	290
400	80	17.7	354
500	100	24.8	496

O procedimento de titulação para determinação da dureza total foi realizado de acordo com o procedimento publicado em, APHA, AWWA, WFCF (2005).

Os resultados obtidos apresentaram um valor inferior ao esperado devido à precipitação do carbonato de cálcio, decorrente de sua baixa solubilidade.

RESINA DE TROCA CATIONICA

A especificação técnica da Resina Purolite C100, conforme a ficha técnica do produto, destaca que a capacidade de troca iônica da resina é de 2.0 eq L^{-1} (na forma Na^+), e um peso específico de 800 à 840 g L^{-1} . A resina possui uma capacidade de troca de 1.54 Kg L^{-1} (valor convertido da unidade de medida presente na especificação técnica do produto, 43,7 Kg ft^3). A Figura 1 apresenta a resina utilizada no experimento em erlenmeyers.

Figura 1: Resina Utilizada (Purolite C100)



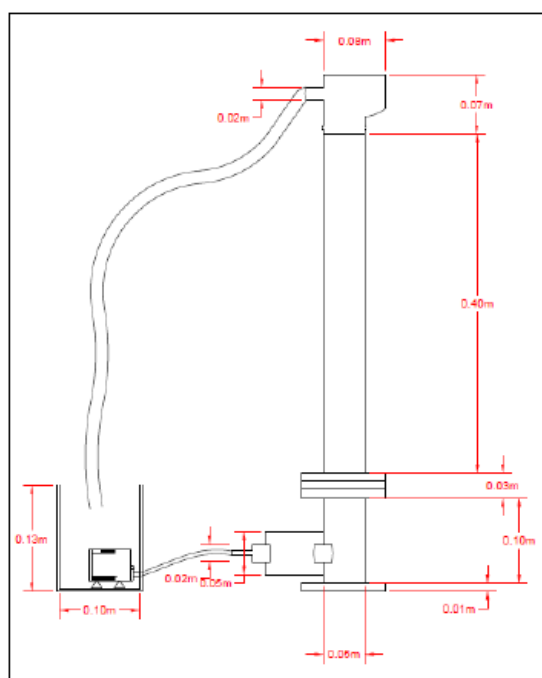
DESCRIÇÃO DO SISTEMA EXPERIMENTAL

O sistema experimental estava composto por um reator de leito fluidificado, um reservatório de recirculação e uma bomba submersível.

O reator operava em bateladas sequenciais e foi construído a partir de um tuboacrílico com 40 cm de comprimento e 50 mm de diâmetro interno. O afluente entrava reator pela parte inferior, fluidificando a resina até uma altura de 40 cm. A saída de água se dava por uma mangueira lateral, localizada na porção superior do reator. Uma membrana de tecido permeável atuava como sistema de drenagem do reator impedindo a passagem de resina do módulo superior para o inferior

O reservatório de circulação do afluente possuía 100 mm de diâmetro e 12 cm de altura e tinha a função de alojar a bomba sumersível, a Figura 2 demonstra o esquema.

Figura 2: Esquema do sistema experimental



De forma a manter a vazão constante e superar a perda de carga envolvida, utilizou-se uma bomba submersível (Sarlo Better 1000a), com vazão regulável e pressão máxima de 2 m.c.a. A vazão utilizada foi de 0,016 L.s⁻¹. Uma vez que o sistema foi projetado de forma a operar em batelada a bomba foi instalada no recipiente de recirculação, mantendo apenas o volume necessário para que permanecesse submersa, de forma que o volume total do sistema foi de 1,7 L. Destes, 1 L corresponde ao volume do reator e 700 ml ao do reservatório de recirculação.

Para verificar a quantidade de resina a ser utilizada durante a operação foram realizados ensaios de remoção. Para tanto, foram utilizados 3, 5 e 10 g de resina em erlenmeyers com água com dureza de 50 mg CaCO₃.L⁻¹. Foram tomadas aferições de dureza ao longo do tempo, de forma a verificar a eficiência de remoção, portanto, adotou-se o valor de 5 min para cada concentração de resina, admitindo como remoção mínima nesse intervalo de tempo 50 % da dureza total. Sendo assim, num volume de 50 mL foi utilizado 3,007 gramas de resina para redução da dureza total em 50 % num período de 5 min. Esse teste foi realizado utilizando agitação magnética da amostra de água em um erlenmeyer de 300 mL, simulando a agitação da resina que obtida em um reator. Visto que o resultado encontrado foi aceitável, definiu-se a proporção de resina a ser utilizada para o volume total de água utilizado no reator, portanto, verificou-se que seriam necessários 90 g de resina para a operação do reator, utilizada em todo tempo que o reator estava sendo utilizado.

MONITORAMENTO DO SISTEMA

Durante a operação do reator as análises se deram de forma a contemplar o período de tempo estimado para o tratamento de cada afluente. Dessa forma, adotou-se os intervalos de 3, 10, 20, 30, 40 e 60 min. O primeiro intervalo foi definido em 3 min devido a que caracteriza o primeiro percurso do líquido através do leito de resina fluidificada permitindo aferir a dureza antes da recirculação.

Após cada intervalo de tempo foi retirada uma amostra de 50 ml, usando a mangueira de entrada no recipiente de recirculação. Cada uma das amostras foi submetida a medição de pH, e dureza total, por meio da titulação de CaCO₃. Dessa forma, no total foram aferidas 36 amostras, 6 para cada uma das faixas de dureza dos afluentes sintéticos e mais 6 para a água do poço.

Além da análise no reator, foi necessário realizar o teste de exaustão da resina, para considerar o tempo de operação a que a resina estaria sujeita antes que fosse necessária a regeneração de sua capacidade de troca iônica. Para tanto, foram preparados 2 L de afluentes sintéticos com 516 mg CaCO₃.L⁻¹ de dureza e utilizados 6 litros do afluente de água subterrânea com 168 mg CaCO₃.L⁻¹ de dureza. Foram realizadas análises com 10 min de intervalo por 2 h com o afluente de água subterrânea, porém não era alcançado a exaustão da resina, sempre atingindo 100 % de remoção de dureza. Então, iniciou-se um novo teste de exaustão, utilizando a mesma resina, e tendo como afluente nas 2 primeiras horas o afluente sintético com 516 mg.L⁻¹ de dureza. A Tabela 2 demonstra o valor inicial encontrado de dureza total para cada afluente.

Tabela 2: Valor de dureza total para simulação da saturação de resina.

Identificação	Resina (g)	Dureza titulada (ml EDTA)	Dureza Total inicial (mgCaCO ₃ /L)
1	90	25.8	516.00
2	90	25.8	516.00
3	90	8.4	168.00
4	90	8.4	168.00
5	90	8.4	168.00

Uma vez que o reator já havia operado por 2 horas, substituiu-se os afluentes de 516mg.L⁻¹ de Dureza pelos afluentes de água coletada em campo. Para esses novos afluentes, foram analisadas também a dureza total em períodos de tempo iguais, de 10 min utilizando a mesma resina.

A cada hora de atividade do reator o afluente foi trocado, a fim de expor a resina ao maior contato com dureza, para alcançar sua exaustão. A exaustão da resina aconteceu quando a dureza total não variou nas amostras ao longo do tempo. Isso se deu no tempo 2 horas e 40 min utilizando o afluente com 168 mg/L-1.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados apresentados na Tabela 3 correspondem à dureza apresentada por amostras dos afluentes sintéticos preparados em laboratório, ainda não submetidos à troca iônica no reator de leito fluidificado.

Tabela 3: Caracterização inicial dos afluentes

Coleta	Dureza Total (inicial mg CaCO ₃ /L)	Dureza total (mg CaCO ₃)	Dureza total (mg CaCO ₃)	Dureza total (mg CaCO ₃)	Dureza total (mg CaCO ₃)	Dureza total (mg CaCO ₃)	Dureza total (mg CaCO ₃)
Nº	Inicial	3 min	10 min	20 min	30 min	40 min	60 min
BR	10.00	0	0	0	0	0	0
1	50.00	16	14	6	2	1	0.5
2	160.00	86	68	56	48	36	18
3	290.00	230	190	156	122	90	68
4	354.00	228	200	184	168	136	104
5	496.00	324	292	278	248	180	122
PDG 19-1	180.00	14	4	2	0.2	0.14	0.00002

Com os resultados acima expostos, é possível inferir que a dureza total inicial da maior parte dos afluentes sintéticos ficou abaixo da esperada, principalmente o valor do afluente 1, cujo valor na primeira aferição manteve-se em cerca de metade do valor esperado para Dureza Inicial, de 100 mg CaCO₃.L⁻¹. Destaca-se ainda que o pH inicial de todas os afluentes tende para um valor mais básico, de fato, conforme apontado por Celligoi (1999), se tratando de águas subterrâneas, o carbonato de cálcio é um dos agentes causadores de alcalinidade.

Em seguida as águas foram tratadas pela resina de troca catiônica no reator por um período de 60 min, conforme estabelecido na metodologia. Dessa forma, foram coletadas amostras de 50 mL nos intervalos de tempo predeterminados, tendo o pH e a dureza analisados imediatamente, evitando que ocorresse a precipitação da fase sólida da solução. Os testes seguiram a ordem da amostra de número 5 até a amostra 1, e por último o afluente PGD 19, realizando a lavagem do reator com água destilada, do recipiente de recirculação e da bomba entre cada execução para maior eficiência.

Os gráficos 1 ao 6, a seguir, mostram os resultados de remoção obtidos, bem como a eficiência de remoção ao longo do período de operação do reator. Nos gráficos, a linha em preto representa a curva de ajuste exponencial dos pontos, ao lado a equação dessa curva com os respectivos R² e em vermelho é mostrada a eficiência em porcentagem de remoção de Dureza Total, a partir do tempo.

Gráfico 1: Representação do afluente sintético n° 1.

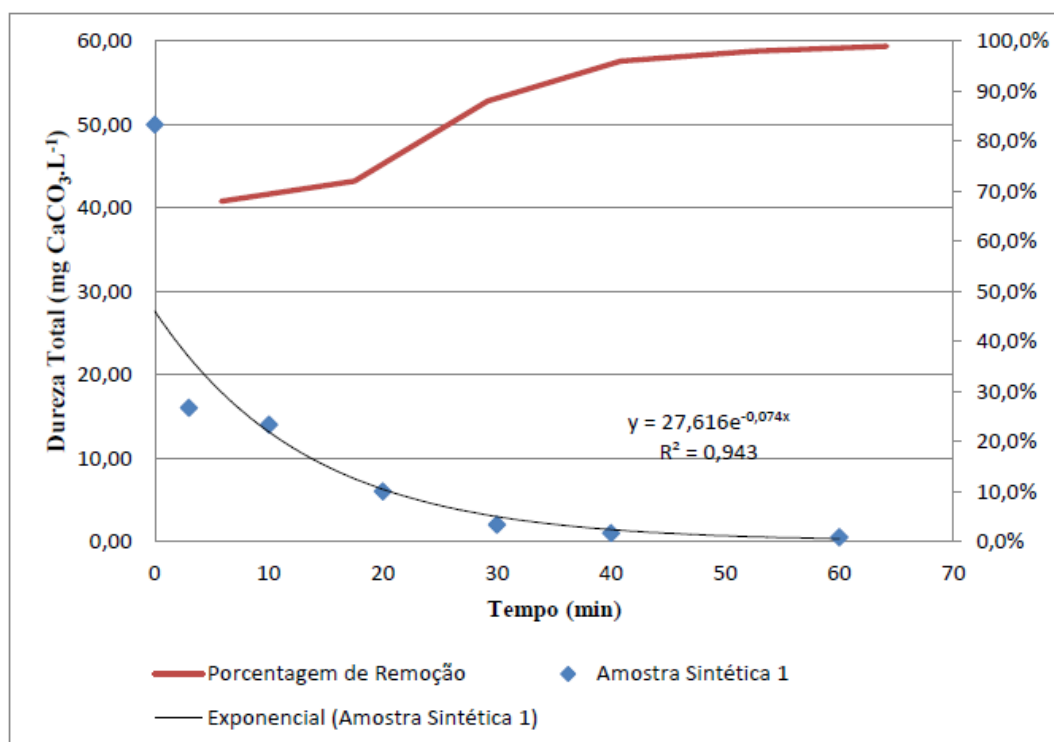


Gráfico 2: Representação do afluente sintético n° 2.

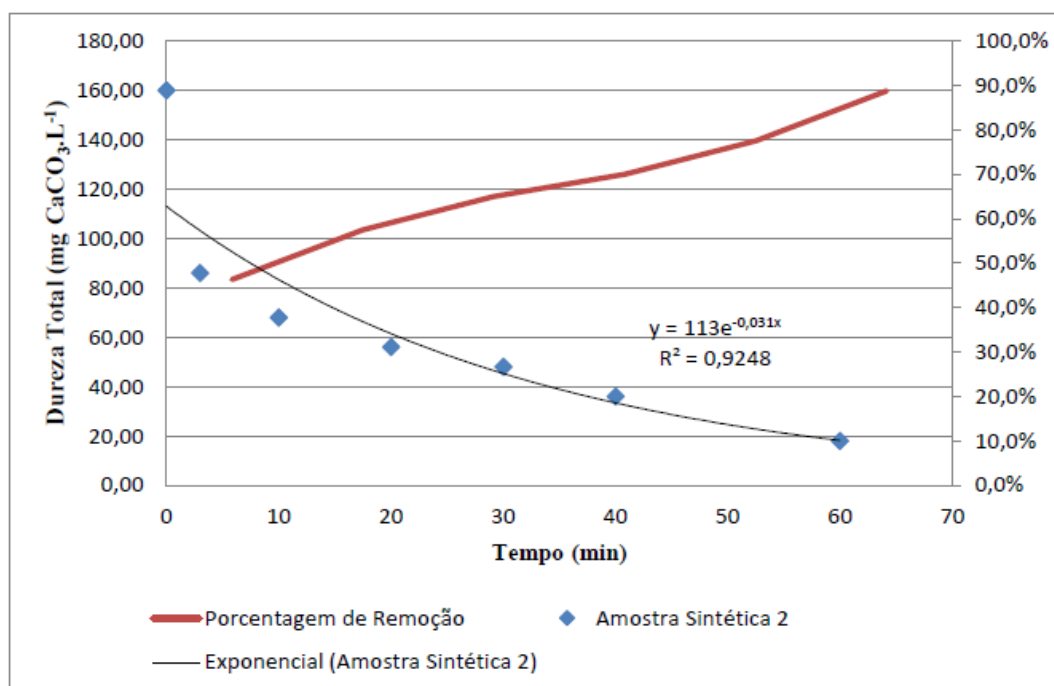


Gráfico 3: Representação do afluente sintético n° 3.

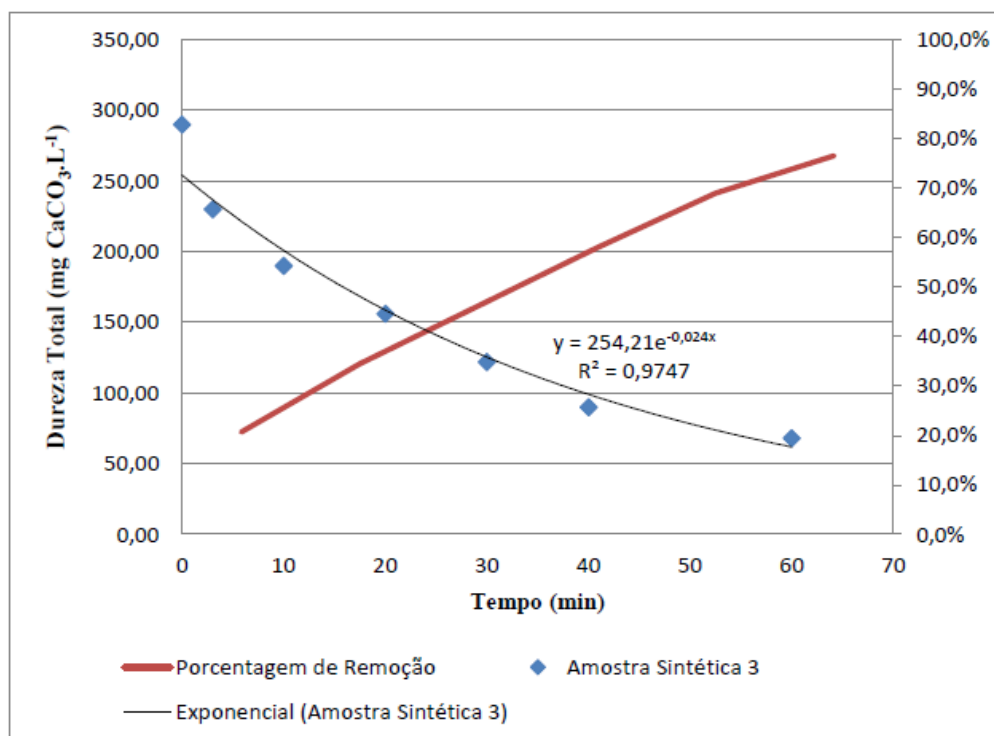


Gráfico 4: Representação do afluente sintético n° 4.

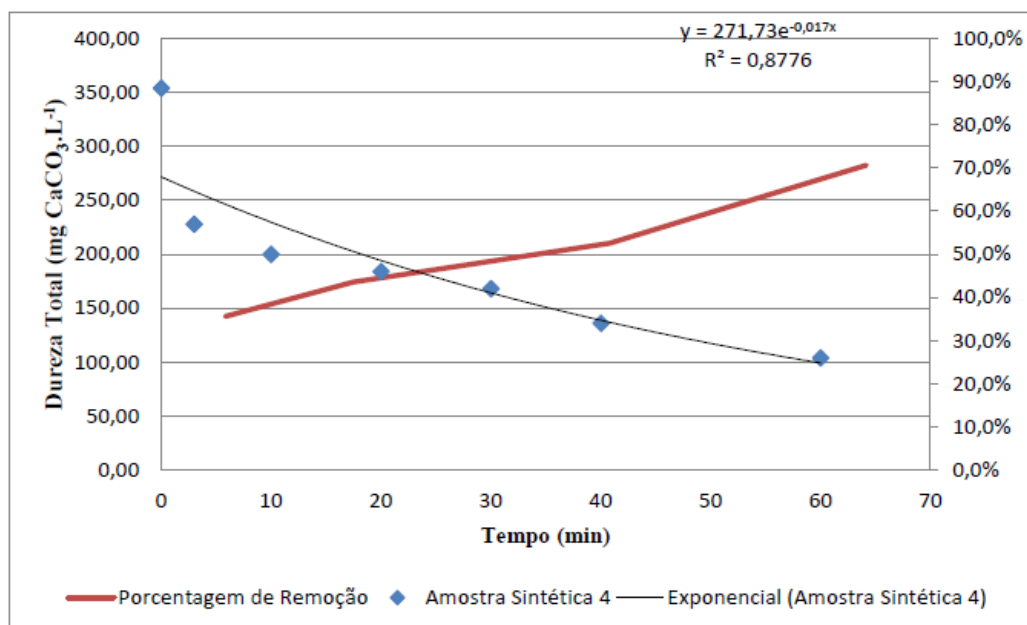


Gráfico 5: Representação do afluente sintético n° 5.

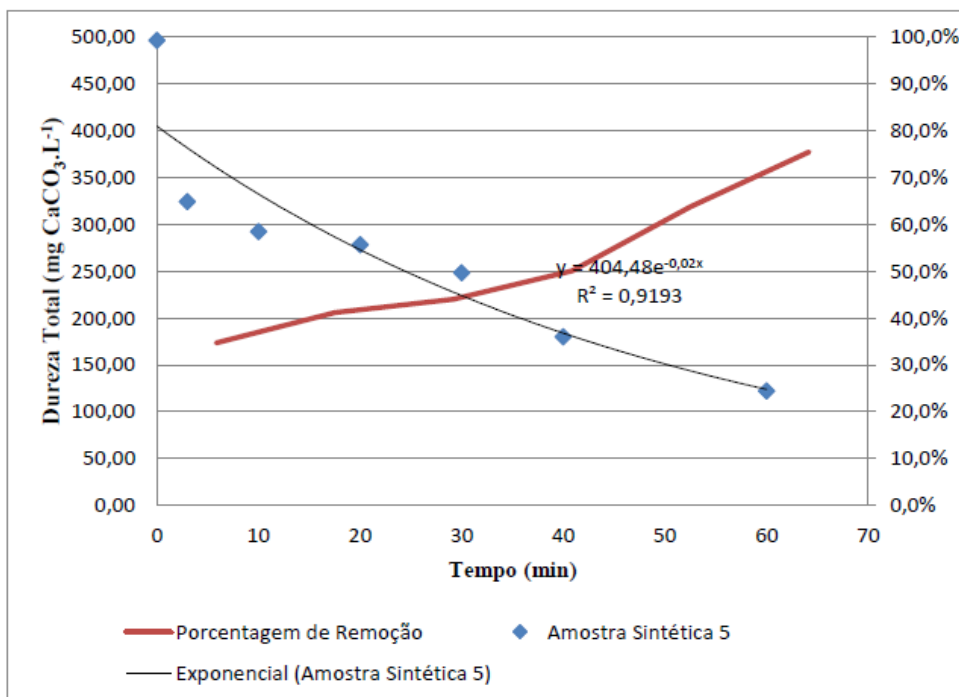
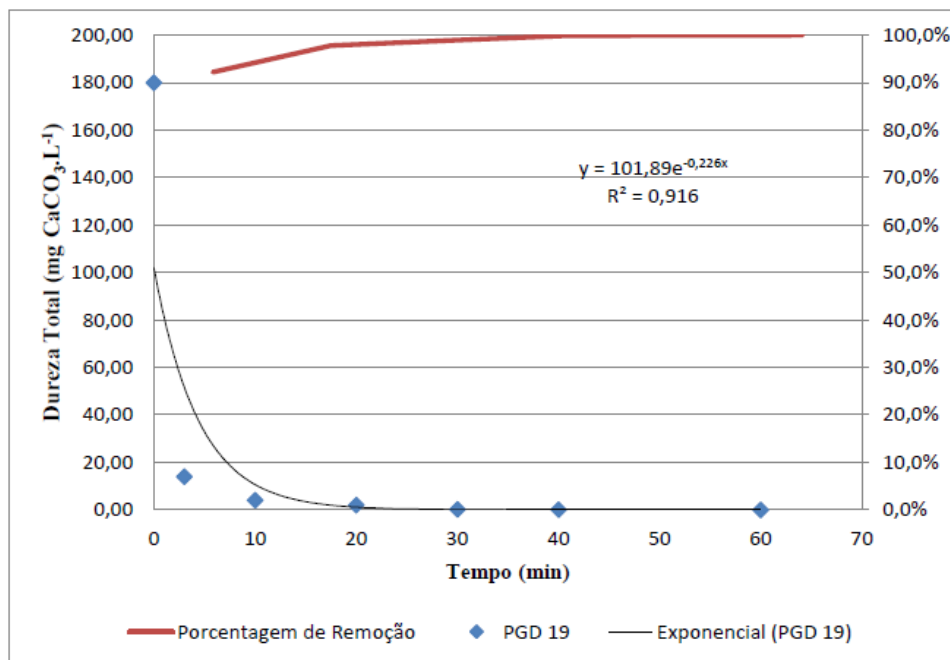


Gráfico 6: Representação do afluente PDG 19.



Observa-se que, independentemente da dureza inicial utilizada, o intervalo de tempo de 3 min, tempo aproximado em que acontece a primeira circulação da amostra no leito fluidificado, foi em que houve a queda mais acentuada na curva de remoção, indicando a maior eficiência. Em todos os testes, após esse período inicial a inclinação da curva é menos acentuada nos intervalos subsequentes. Essa queda brusca nos primeiros 3 min pode ter explicação devido ao fato de que no início o leito está iniciando sua fluidificação com maior perda de carga devido à menor velocidade de escoamento antes de se estabilizar a velocidade de fluidificação, por isso, a amostra passa por um maior tempo de contato com a resina semi-fluidificada quando em comparação com a

recirculação com o leito já fluidificado, podendo ser evidenciado em todos os gráficos. Além disso, uma das vantagens do leito fluidificado é o maior contato com a resina e gradientes.

Ao observar a remoção das amostras sintéticas, é visível que o reator foi mais eficiente nas faixas de menor dureza, como era esperado, visto que foi mantida a mesma proporção de resina. Pode-se notar que os afluentes números 3, 4 e 5 (Gráfico 3, Gráfico 4 e Gráfico 5) levaram 60 min para remover um valor superior a 70 % da dureza inicial, sendo que este índice foi atingido pelo afluente nº 2 (Gráfico 2) na metade do tempo, e o afluente nº 1 (Gráfico 1), tratando 50 de dureza, chegou a esse valor em apenas 10 min. Vale ressaltar que a dureza total deste afluente já estava bem próxima a esse valor na primeira circulação no leito fluidificado, sendo que foram 68,0 % de remoção em apenas no 3 primeiros min de operação. A Tabela 4 tem como objetivo facilitar a observação desses valores.

Tabela 4: Decaimento da Dureza Total dos Afluentes ao longo do tempo.

Nº	Afluente	Resina (g)	Diferença de altura (m)	pH (inicial)	Dureza titulada (ml EDTA)	Dureza Total (inicial mg CaCO ₃ /L)
BR	Branco	90.0	1.10	8.60	0.50	10.00
1	Sintética	90.0	1.10	8.83	2.50	50.00
2	Sintética	90.0	1.10	8.62	8.00	160.00
3	Sintética	90.0	1.10	8.22	14.50	290.00
4	Sintética	90.0	1.10	8.22	17.70	354.00
5	Sintética	90.0	1.10	8.41	24.80	496.00
PGD 19* (1)	Colinaçu - Campinorte	90.0	1.10	7.89	8.00	180.00
PGD 19* (2)	Colinaçu - Campinorte	90.0	1.10	7.85	8.40	168.00

* PGD 19 é a denominação do poço do qual foram retiradas os afluentes de água subterrânea.

Nota-se que há um certo grau de similaridade dos afluentes de número 1 a 5 e por isso é interessante notar que a curva foi mais acentuada para o afluente PGD 19, obtendo inclusive o melhor resultado dentre as amostras analisadas. Com efeito, esperava-se um comportamento diferente visto não se tratar de um afluente sintético e possuir, visivelmente, menor cor e turbidez, que poderiam interferir no resultado. Entretanto, uma queda tão elevada foi surpreendente já que o afluente em questão apresentou dureza inicial superior às das amostras números 1 e 2.

A Tabela 5 demonstra as equações exponenciais obtidas nas análises de dureza total das amostras. A função exponencial tem como forma base a Equação 2, demonstrando que para se conhecer o valor de y, que no caso é o valor da dureza total, é necessário um número representado por *a* multiplicado por exponencial de uma constante, k, versus o tempo. O elemento mais importante de tais equações é o valor de k, de fato, nota-se que o valor do afluente PGD 19 possui um k bastante diferente dos outros afluentes, destacando também, que o valor de k aumenta, em módulo, do afluente com maior dureza total para o afluente com menor dureza total, com exceção da afluente 4. A constante representa o decaimento da curva, ou seja, quanto maior for o valor de k, em módulo, a dureza total será removida em menos tempo. Por

$$y = a * e^{(kt)} \quad (2)$$

Tabela 5: Equações exponenciais obtidas nos gráficos de remoção de dureza total

Amostra	Equação
1	$y=27.616*e^{(-0.074t)}$
2	$y=113*e^{(-0.031t)}$
3	$y=254.21*e^{(-0.024*t)}$
4	$y=271.73*e^{(-0.017*t)}$
5	$y=404.48*e^{(-0.02*t)}$
PGD 19	$y=101.89*e^{(-0.226*t)}$

Quanto à exaustão da resina, observou-se que ocorreu uma grande diferença entre a amostra sintética e amostra PGD 19-3. Os gráficos 7 e 8, representam, respectivamente, a análise com a mesma resina, duas vezes com 516 de dureza total (sintética) e duas vezes com 168 de dureza total (do PGD 19-3). No gráfico 7 a curva é menos acentuada que a curva do gráfico 8, verificado nas curvas exponenciais. O gráfico 7 demonstra que ocorre uma certa diferença entre as durezas a partir do tempo, na curva em azul mostra que encontrou-se um valor de dureza inferior nos tempos utilizados, mostrando que em 60 min ocorreu uma certa diferença na capacidade da resina.

Gráfico 7: Teste de exaustão da resina com amostras sintéticas de Dureza Total inicial de 516 mg CaCO₃.L-1.

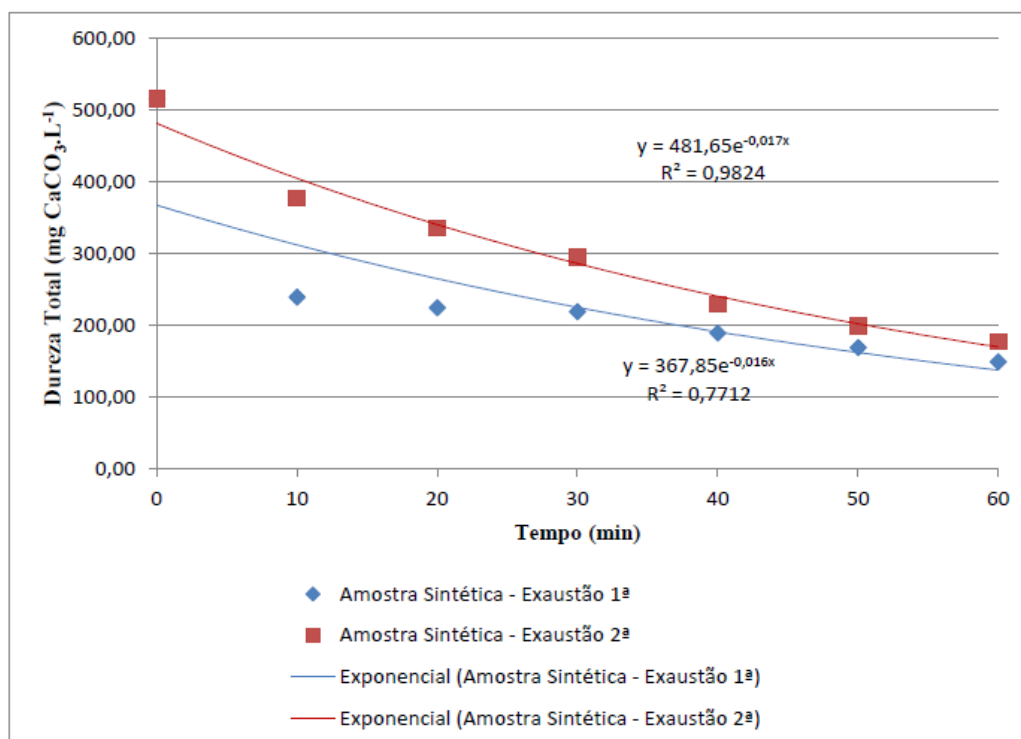
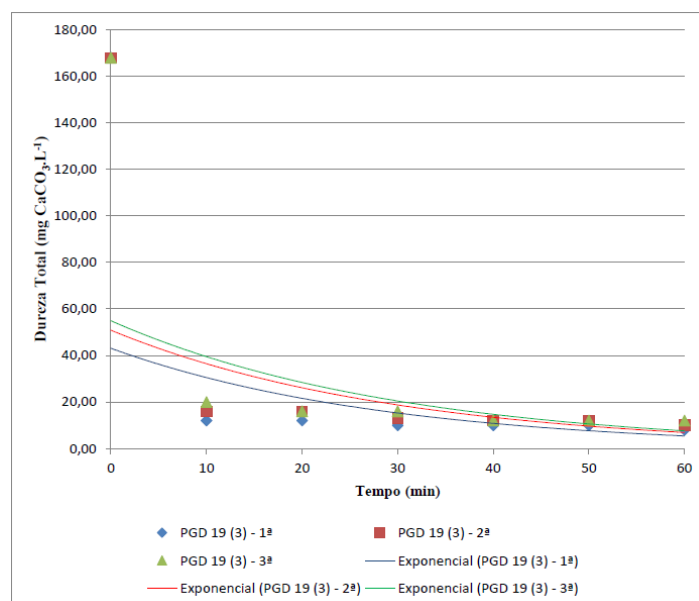


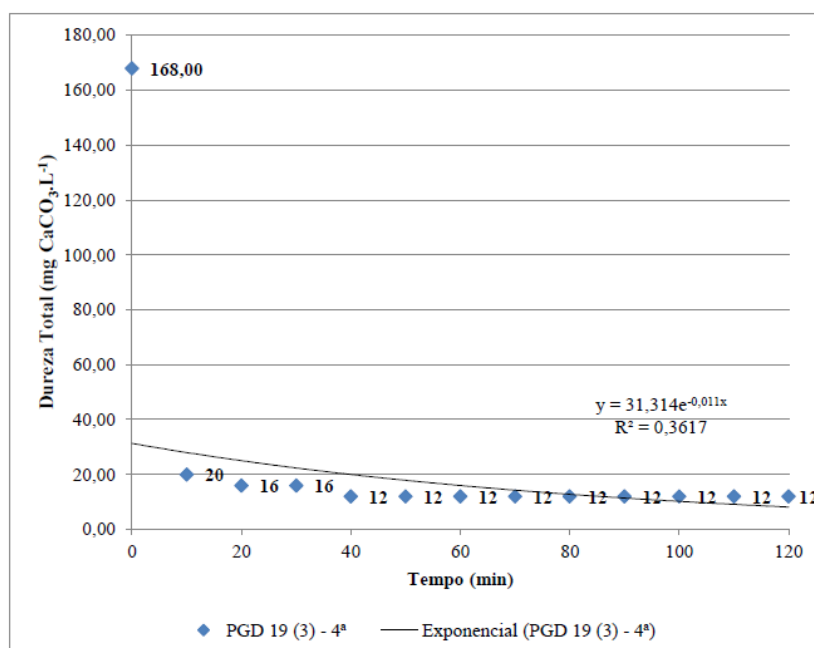
Gráfico 8: Teste de exaustão da resina com amostras PGD19 de Dureza Total inicial de 168 mg CaCO₃.L⁻¹



E por fim, apresenta-se o gráfico 9 que mostra o teste de saturação realizado com a mesma resina, porem tratando a amostra PGD 19 (3). As amostras finais possuem a mesma quantidade de EDTA utilizado na titulação, ressaltando que a resina saturou e não foi capaz de reduzir a concentração de carbonato de cálcio como anteriormente, por isso destacou-se os valores das durezas nos tempos utilizados. Desta forma, destaca-se que a partir de 4 horas e 40 min. de teste, sendo 2 horas de teste realizado com dureza inicial de 516 mg CaCO₃.L⁻¹ e 2 horas e 40 min realizado com dureza inicial de 168 mg CaCO₃.L⁻¹, a resina foi saturada, sendo necessário regenerar a mesma para continuar o tratamento.

O gráfico 9 mostra o momento de saturação da resina, que se deu na 3ª amostra PDG 19, onde a partir de 40 min a dureza total de todas as amostras coletas foi a mesma, configurando o momento em que a resina perdeu sua capacidade de remoção, fenômeno chamado exaustão.

Gráfico 9: Teste de exaustão da resina com amostras PGD19-3 4ª de Dureza Total inicial igual a 168 mg CaCO₃.L⁻¹.



Por fim, destaca-se, a título de comparação, o resultado apresentado por Paim (*et al* 2010) na utilização de 10 g de carvão ativado em leito fixo, obteve uma remoção média de 57,86 % de mg de CaCO_3 no tratamento de 100 ml de água com dureza média de 25,90 mg $\text{CaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$. Se considerarmos o afluente sintético nº1, com dureza inicial de 50 mg $\text{CaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$, tratada com 90 g de resina, houve remoção de 68 % da dureza nos três primeiros min. Da mesma forma, o afluente sintético nº2, nº3, nº4 e nº5 tiveram sua dureza removida em 46,3, 20,7, 35,6, 34,7 % respectivamente, no mesmo intervalo de tempo. Destaca-se ainda que a resina foi capaz de tratar uma amostra, tendo a dureza e composição (sintética ou natural) por 4 horas e 40 min antes que perdesse sua capacidade de troca iônica, deixando claro que, no caso de águas com dureza natural, seu rendimento foi melhor, prolongando seu tempo de operação.

CONCLUSÕES

Em posse das análises e após realizadas as implicações, destaca-se de forma positiva a eficiência alcançada, principalmente quando considerada amostra de campo, visto que se trata de uma solução do modo como é encontrada in-natura. Para essa amostra a operação foi satisfatória, tendo sua dureza virtualmente zerada em menor tempo do que o previsto, ou seja que foram necessários menos de 30 min para tratar 1,5 litros de água com dureza inicial de 180 mg $\text{CaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$. Os resultados mostraram-se bastante satisfatórios também nas amostras sintéticas, que simulam uma dureza mais elevada, como esperado foi necessário um tempo maior de operação, contudo, com cerca de 20 min de operação, a amostra com maior dureza já apresentou remoção superior a 40 %. Além da capacidade de tratamento da resina, há de se considerar o resíduo gerado durante a operação. A resina, carregada com Na^+ , quando em contato com a água dura, gera bicarbonato de sódio, conforme demonstrado na equação estequiométrica anteriormente, sendo necessário observar este fator quando da implementação desse tratamento aliado a outros, como a desinfecção por cloro, por exemplo, devido aos sais formados na mistura. Outro aspecto relevante é a capacidade de tratamento após a recarga da resina, contudo, devido a ausência dos reagentes necessários para a realização do procedimento, não houve a recarga da resina, bem como a consequente análise de eficiência após a regeneração.

Afim de contribuir para a continuidade do estudo, destaca-se a necessidade de avaliar o comportamento da resina quando em contato com outros íons, ou mesmo quando ocorre a presença de mais de um deles, em águas que apresentem altas concentrações de cálcio e ferro, por exemplo. Para o presente trabalho foi possível obter uma amostra de água que apresenta dureza elevada, mas sem a interferência de outros íons, fator que simplifica o tratamento e análise da amostra. Visto que a resina não é absolutamente restritiva, ela poderia se ligar a outros íons, afetando diretamente sua eficiência conforme a variação da concentração de íons presentes na amostra.

Chama-se atenção ainda para estudos quanto ao comportamento do sistema na presença de outras características físicas, por exemplo uma turbidez elevada e, nesse sentido, utilizar o reator com outro método de tratamento aliado, constatando a viabilidade da utilização do reator como parte integrada a um sistema de tratamento de água.

O trabalho proposto apresenta-se como uma alternativa para o tratamento de água subterrâneas que apresentam dureza elevada, através da remoção de íons por troca catiônica, ocupando um espaço importante dentro das novas tecnologias de tratamento de água, visto que o tratamento convencional ainda não é capaz de solucionar estes problemas de forma tecnicamente viável.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. APHA, AWWA, WPCF American public health association; American water works association; water environment federation. Standand Methods For the examination of water and wastewater. 21. Ed., 2005. Washington, D.C, USA.
2. BRASIL, Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA). Resolução CONAMA nº 396. 2008.
3. BRASIL, Ministério da Saúde. Portaria nº 2.914 em 12 de dezembro de 2011. Normas e Padrão de potabilidade de água destinada ao consumo humano.
4. CELLIGOI, A. Considerações sobre análises químicas de águas subterrâneas. Geografia, Londrina, V. 8, n. 1, p. 91-97, jan./ jun. 1999

5. DIAS, C. L., BARBOUR, E. D. A., TOFFOLI, F. F., ACINI, R., LEMOS, M. G., SILVA, C. M., & CASARINI, D. P. O monitoramento da qualidade das águas subterrâneas do estado de São Paulo (período 2004 a 2006), 2007.
6. FERREIRA, C. S., HERDER, I., COSTA, M. L., & FERREIRA, A. D. Monitorização da qualidade da água subterrânea na Escola Superior Agrária de Coimbra. 2009
7. MOURÃO, M. A. A. Projeto: Implantação de Rede Integrada de Monitoramento das Águas Subterrâneas. Recursos Hídricos. Programa de Aceleração ao Crescimento – PAC. 2009.
8. PENA, R. F. A., Águas Subterrâneas. Mundo Educação. Disponível em: <http://mundoeducacao.bol.uol.com.br/geografia/Aguas-subterraneas.htm>. 2015. Acesso em: 15/02/2016.
9. PUROLITE. Ficha Técnica do Produto. Purolite C100. EUA, 1p. 2012.
10. QUEIROS, Y. G. C.; CLARISSE, M. D.; OLIVEIRA, R. S.; REIS, B. D.; LUCAS, E. F. Materiais Poliméricos para Tratamento de Água Oleosa: Utilização, Saturação e Regeneração. Polímeros: Ciência e Tecnologia, vol. 16, nº 3, p. 224-229, 2006
11. SANEAMENTO DE GOIÁS S/A (SANEAGO). Manual de Operação de Estação de Tratamento de Água. Goiânia. 2006. 150 p.
12. SILVA, K. D. F. N. L., da Silva, C. T. S., & de CARVALHO, C. M. Caracterização bacteriológica, hidroquímica e físicoquímica das águas subterrâneas das comunidades de km 60 e sucupira na chapada do apodi limoeiro do Norte–Ceará. Águas Subterrâneas, 2011.
13. SILVA, M. L. DA, BONOTTO, D. M. Hidroquímica elementar e dos isótopos de urânio em águas subterrâneas da formação alter do chão, Manaus (AM). Revista Brasileira de Geociências. 36 (3): 437-448, setembro de 2006
14. TAVARES, G. A.; BENDASSOLLI, J. A.; SOUZA, G.; NOLASCO, F. R. Implementação de uma estação de produção de água desionizada para uso nos laboratórios do CENA/USP empregando resinas de troca-ionica. Revista Analytica, No 10, Abril-Maio, 2004.
15. TEXEIRA, V. G.; COUTINHO, F. M. B.; GOMES, A. S. Resinas Poliméricas para separação e pré-concentração de chumbo. Quim. Nova, Vol. 27, No. 5, 754-762, 2004.