

2018. Ministério da Saúde. Fundação Nacional de Saúde.



Esta obra é disponibilizada nos termos da Licença Creative Commons – Atribuição – Não Comercial – Compartilhamento pela mesma licença 4.0 Internacional. É permitida a reprodução parcial ou total desta obra, desde que citada a fonte. A coleção institucional do Ministério da Saúde pode ser acessada, na íntegra, na Biblioteca Virtual em Saúde do Ministério da Saúde:

Tiragem: 1ª edição – 2018 – 3.000 exemplares

Elaboração, distribuição e informações:

Ministério da Saúde
Fundação Nacional de Saúde
Departamento de Engenharia de Saúde Pública (Densp)
Coordenação Geral de Cooperação Técnica em Saneamento (Cgcot)
Coordenação de Desenvolvimento Tecnológico em Engenharia Sanitária (Codet)
SRTVN 702, Via W 5 Norte – Edifício PO 700 – 2º andar
Brasília, DF, 70.723-040
Tel.: (61) 3314-6233 3314- 6518
Home page: <http://www.funasa.gov.br>

Elaboração:

Filomena Kotaka
Cibele Medeiros Brito Leite
Cristine Diniz Santiago
Maria das Graças Dias
Rosa Maria Vahia Terzella
Selma Irene Antonio

Autores das pesquisas:

Adilson Ben da Costa
Ana Lucia Nogueira de Paiva Britto
Léo Heller
Helena Ribeiro
Pedro Roberto Jacobi
Sibele Berenice Castellã Pergher
Sonaly Cristina Rezende Borges de Lima

Editor:

Coordenação de Comunicação Social (Coesc/GabPr/
Funasa/MS)
Divisão de Editoração e Mídias de Rede (Diedi)
SRTVN 702, Via W 5 Norte – Edifício PO 700 – 2º andar
Brasília, DF, 70723-040

Diagramação:

All Type Assessoria Editorial Ltda
Marcus Vinicius Mota de Araújo
Fone: (61) 928420-3636

Impresso no Brasil/Printed in Brazil

Ficha Catalográfica

Brasil. Ministério da Saúde. Fundação Nacional de Saúde.

9º Caderno de pesquisa em Engenharia de Saúde Pública / Ministério da Saúde, Fundação Nacional de Saúde.– Brasília : Funasa, 2018.
256 p.

ISBN: 978-85-7346-055-1

1. Pesquisa em Saneamento. 2. Gestão em saneamento. 3. Saneamento básico. I. Título.

CDU.628

Catálogo na fonte – Divisão de Museu e Biblioteca – Funasa

Título para indexação:

Em inglês: 9th Research Book in Public Health Engineering

Em espanhol: 9º Caderno de Investigación de Ingeniería de Salud Pública

Sistemas de tratamento para desfluoretação parcial de águas subterrâneas com presença de flúor superior à estabelecida na Portaria MS nº 2.914/2011

Coordenador da Pesquisa: Adilson Ben da Costa

Participantes: Eduardo Lobo Alcayaga, Alcido Kirst, Ênio Leandro Machado, Rosana de Cassia de S. Schneider, Liane Mahlmann Kipper, Dionei Minuzzi Delevati

Instituição Executora: Departamento de Biologia e Farmácia – Universidade de Santa Cruz do Sul (UNISC)

Instituição Conveniente: Associação Pró Ensino em Santa Cruz (APESC)

Resumo

Esse estudo teve como objetivo o desenvolvimento de sistemas para a remoção do excesso de fluoreto de águas subterrâneas, adequando-as ao consumo humano conforme a Portaria nº 2.914/2011 do Ministério da Saúde do Brasil. Assim, foram desenvolvidos dois sistemas distintos de desfluoretação utilizando carvão ativado de osso. O sistema de desfluoretação por adsorção, usando 6 kg de carvão ativado de osso, foi adequado para a instalação no ponto de uso, com uma vazão de até 36 L.h⁻¹, com um investimento de aproximadamente R\$ 600,00. O sistema de precipitação por contato, usando 235 kg de carvão ativado de osso, foi adequado para atender a demanda de redes de abastecimento de água de pequenas comunidades, com um investimento de R\$ 11.000,00, atuando com uma vazão de 600 L.h⁻¹. Contudo, esse mesmo sistema pode ser atualizado para suportar vazões de até 2.800 L.h⁻¹, sem prejuízo à qualidade da água. Os resultados dessa pesquisa foram utilizados, também, para produzir um manual para montagem e operação dos sistemas para desfluoretação de águas de abastecimento, no intuito de socializar essa tecnologia para o fornecimento de água potável em diferentes comunidades do Brasil.

Palavras-chave: Saúde Pública, Fluoreto, Carvão Ativado de Osso, Adsorção, Precipitação por Contato.

Abstract

This work had as its objective the development of systems for the removal of fluoride excess from groundwater, adjusting the water quality to human consumption, according to Resolution nº 2.914/2011 by the Health Ministry of Brazil. Thus, two different defluoridation systems using activated bone charcoal were developed. The defluoridation system by adsorption, using 6 kg of the bone charcoal, was suitable to installation at consumption points, with a flow rate of about 36 L.h⁻¹ and with an investment around R\$ 600.00. The defluoridation system by contact precipitation using 235 kg of bone charcoal was suitable for small communities water supply networks, with an investment of about R\$ 11,000.00, providing a flow rate of about 600 L.h⁻¹. However, the same system can be upgraded up to 2,800 L.h⁻¹, without damage to water quality. The results of this research were used to produce a technical manual of assembly and operation of these systems in order to socialize this technology for drinking-water supply in different communities of Brazil.

Keywords: Public Health, Fluoride, Activated Bone Charcoal, Adsorption, Contact Precipitation

1. Introdução

No Brasil, e particularmente no interior do estado do Rio Grande do Sul, muitos municípios não dispõem de um sistema público de abastecimento de água, sendo que os que o possuem limitam-se apenas à área urbana do município. Em virtude disso, as comunidades que não dispõem de água tratada utilizam a água proveniente de poços e fontes naturais, denominados sistemas alternativos de abastecimento. Em muitos casos, contudo, a água dessas fontes não apresenta condições de ser consumida sem um tratamento prévio, devido ao fato de algumas características físicas, químicas ou microbiológicas apresentarem valores em desacordo com os padrões de potabilidade.

No que se refere às características químicas da água, a concentração de fluoreto, particularmente, tem chamado atenção de diferentes grupos de pesquisa em todo o Brasil. De fato, a ocorrência de fluorose dental em crianças vem sendo diagnosticada na região dos Vales do Rio Pardo e Rio Taquari, RS, como uma patologia associada ao consumo prolongado de água com excesso de fluoreto (COSTA e LOBO, 1997).

A Universidade de Santa Cruz do Sul (UNISC), ciente da gravidade do problema, vem desenvolvendo desde 1996 estudos voltados à confecção de um sistema eficiente e de baixo custo, capaz de reduzir a concentração de fluoreto na água de abastecimento até valores adequados ao consumo humano, com o propósito de erradicar a fluorose dental nas comunidades que utilizam água subterrânea para abastecimento (COSTA e LOBO, 1997; COSTA *et al.*, 2010).

Entretanto, apesar da eficiência desse sistema de desfluoretação, a capacidade de adsorção de fluoreto pelo carvão ativado de osso, em torno de $1.033 \pm 15 \text{ mg.L}^{-1}$, restringe sua aplicação apenas para filtros residenciais, e instalados no ponto de consumo. Isso se constitui numa importante limitação para sua popularização no tratamento de água, pois impede sua utilização como sistema coletivo para o tratamento da água em estabelecimentos comerciais, indústrias e escolas onde volumes maiores de água são consumidos diariamente.

Além disso, o processo artesanal de montagem dos filtros exige habilidades técnicas especiais dos usuários e, mesmo assim, frequentemente são detectados problemas de vazamento, prejudicando o correto funcionamento do processo de adsorção.

Dessa forma, estudos complementares sobre a eficiência do carvão ativado de osso têm sido desenvolvidos pela UNISC, através de trabalhos de conclusão de cursos e bolsas de iniciação científica. Os resultados desses trabalhos têm indicado que a adição de sais de cálcio e fósforo ao carvão ativado de osso permite aumentar sua eficiência de remoção de fluoreto entre 2,3 e 3,6 vezes, além de uma redução no tempo de equilíbrio (tempo de contato entre o carvão e a água) de 90 minutos para menos de 20 minutos. Esse processo é denominado precipitação por contato, que apesar de não totalmente elucidado quanto ao seu mecanismo, diferentes autores o têm utilizado para aumentar a eficiência de materiais na remoção de fluoreto (SAHA, 1993; DAHI, 1997; LARSEN e PEARCE, 2002; WHO, 2006).

Assim, esse projeto de pesquisa dá continuidade a um extenso programa de pesquisa na área de abastecimento de água, que o grupo de pesquisa em Limnologia da UNISC vem realizando há quase duas décadas, contando sempre com o apoio de órgãos de fomento à pesquisa, tanto estaduais como federais, especialmente do Ministério da Saúde, através da Fundação Nacional de Saúde (Funasa).

2. Objetivos

Esse projeto de pesquisa tem como objetivo desenvolver sistemas para a remoção do excesso de flúor de águas subterrâneas, adequando-as ao consumo humano conforme a Portaria nº 2.914/2011 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2011), e elaborar

um manual técnico para a remoção de flúor de águas de abastecimento em pequenas comunidades.

2.1 Objetivos específicos

- Otimizar a eficiência do carvão ativado de osso na remoção de fluoreto da água de abastecimento pela implementação da técnica de adsorção com precipitação por contato.
- Construir um sistema de filtração para desfluoretação, de uso doméstico, utilizando carvão ativado de osso granulado e fibra de polipropileno como meio filtrante.
- Construir um sistema de filtração para desfluoretação, de uso coletivo, utilizando carvão ativado de osso.
- Avaliar a eficiência dos sistemas de desfluoretação em condições reais de operação.
- Avaliar a segurança dos sistemas de desfluoretação segundo a NBR 14.908/2004.
- Elaborar um manual técnico sobre a utilização do carvão ativado de osso em sistemas de remoção de fluoreto.
- Realizar uma oficina técnica para divulgação dos resultados da pesquisa.

3. Metodologia

3.1 Meio adsorvente e fonte de água subterrânea utilizados

No desenvolvimento desse projeto de pesquisa foi utilizado, como meio adsorvente, o carvão ativado de osso granulado (20 x 60 *mesh*) produzido pela empresa Bonechar – Carvão Ativado do Brasil Ltda. Esse material já foi amplamente estudado pela equipe proponente desse projeto de pesquisa (COSTA, 2010; LOBO *et al.*, 2013) e tem sua eficiência comprovada na remoção de fluoreto de águas de abastecimento.

Como fonte de água subterrânea foi utilizada a água da rede de abastecimento da UNISC em Santa Cruz do Sul, RS, a qual utiliza dois poços tubulares profundos cuja concentração de fluoreto varia entre 2,5 e 4,0 mg.L⁻¹.

3.2 Ensaios de desfluoretação de águas de abastecimento

Os estudos de desfluoretação de águas de abastecimento foram conduzidos de forma a abranger diferentes possibilidades de uso do carvão ativado de osso. Assim, sua aplicação foi avaliada em filtros domésticos (ou para uso em escolas), instalados no ponto de consumo, bem como em sistemas coletivos para o tratamento de água para abastecimento público de pequenas comunidades.

3.2.1 Sistema de desfluoretação de uso doméstico ou escolar

Os sistemas de filtração foram desenvolvidos a partir de tanques de fibra de vidro (Structural® PolyGlass®), adquiridos junto a empresa Pentair Hidro Filtros do Brasil Ltda.

Esses sistemas de filtração foram construídos com 6 kg de carvão ativado de osso, com diâmetro de partícula de 20 x 60 *mesh*, e instalados no próprio campus da UNISC em Santa Cruz do Sul, RS. Assim, um filtro foi instalado em um bebedouro localizado no Bloco 12, enquanto os outros quatro filtros foram instalados em três bebedouros e em uma cozinha, localizados no Bloco 8. Todos os sistemas de filtração foram equipados com um hidrômetro e um filtro auxiliar de polipropileno, com 5 µm de grau de filtração.

A Figura 1 e a Tabela 1 apresentam detalhes do projeto desses sistemas de filtração.



Figura 1 – Ilustração do sistema de filtração proposto nesse estudo. A – Filtro de carvão ativado de osso montado em uma estrutura de fibra de vidro (Structural® PolyGlass®); B – Filtro instalado em um bebedouro escolar.

Tabela 1 – Características dos sistemas de filtração instalados em quatro bebedouros e em uma cozinha no campus da UNISC em Santa Cruz do Sul, RS

Informações	Unid.	Filtro 1	Filtro 2	Filtro 3	Filtro 4	Filtro 5
Local de instalação		Bebedouro Bloco 12	Bebedouro Bloco 8	Bebedouro Bloco 8	Bebedouro Bloco 8	Cozinha Bloco 8
Data de instalação		11/07/2013	27/07/2013	27/07/2013	27/07/2013	03/09/2013
Final do monitoramento		03/08/2016	03/08/2016	03/08/2016	03/08/2016	03/08/2016
Díâmetro interno	m	0,229	0,229	0,229	0,229	0,229
Altura total (sem base)	m	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48
Capacidade total	L	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5
Área de superfície	m ²	0,041	0,041	0,041	0,041	0,041
Massa de carvão	kg	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
Densidade do carvão	kg.L ⁻¹	0,675	0,675	0,675	0,675	0,675
Volume de carvão	L	8,9	8,9	8,9	8,9	8,9
Altura da coluna de carvão	m	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22

3.3 Sistema de desfluoretação para abastecimento coletivo

Nessa etapa do projeto foram construídos três sistemas de desfluoretação, identificados como FT1, FT2 e FT3. Os sistemas FT1 e FT2 foram montados a partir de tanques de fibra de vidro (Structural® PolyGlass®) com capacidade total de 44,7 L. O sistema FT3 foi montado a partir de um tanque de fibra de vidro (Structural® Composite), com capacidade total de 458 L. Esses tanques foram adquiridos junto à empresa Pentair Hidro Filtros do Brasil Indústria e Comércio de Filtros Ltda.

Os sistemas FT1 e FT2 utilizaram cada um 25 kg de carvão ativado de osso (20 x 60 *mesh*), e foram testados junto ao Laboratório de Hidrologia da UNISC. O sistema FT3, com 235 kg de carvão, foi instalado para o tratamento da água da rede de abastecimento do Bloco 12 do Campus da UNISC de Santa Cruz do Sul, RS (Tabela 2).

Tabela 2 – Características dos sistemas de desfluoretação FT1, FT2 e FT3

Informações	Unid.	FT1	FT2	FT3
Local de instalação		Área de testes do Bloco 12	Área de testes do Bloco 12	Rede de abastecimento do Bloco 12
Data de instalação		29/05/2014	02/07/2014	06/04/2016
Tempo de monitoramento	dia	107	164	145
Dímetro interno	m	0,229	0,229	0,571
Altura total (sem base)	m	1,24	1,24	1,79
Capacidade total	L	44,7	44,7	451
Área de superfície	m ²	0,041	0,041	0,256
Massa de carvão	kg	25	25	235
Volume de carvão	L	37	37	348
Altura da coluna de carvão	m	1,10	1,10	1,36

O processo de desfluoretação iniciou pelo mecanismo de adsorção, o qual foi conduzido até a saturação do carvão ativado, identificada no instante em que a concentração de fluoreto na água tratada atingiu, ao menos, 95% da concentração média de fluoreto na água natural. A partir desse momento o processo de desfluoretação foi conduzido pelo mecanismo de precipitação por contato, e iniciou-se a dosagem das soluções de cálcio e fósforo. Para auxiliar na mistura dos reagentes, um reator em espiral foi instalado entre o ponto de confluência dos reagentes e o filtro de carvão ativado de osso. Os sistemas de filtração FT1 e FT2 foram equipados com um filtro auxiliar de polipropileno de 5 µm de grau de filtração e, o filtro FT3 com um filtro auxiliar de 50 µm de grau de filtração. As Figuras 2 e 3, e as Tabelas 3 e 4 apresentam esses sistemas.

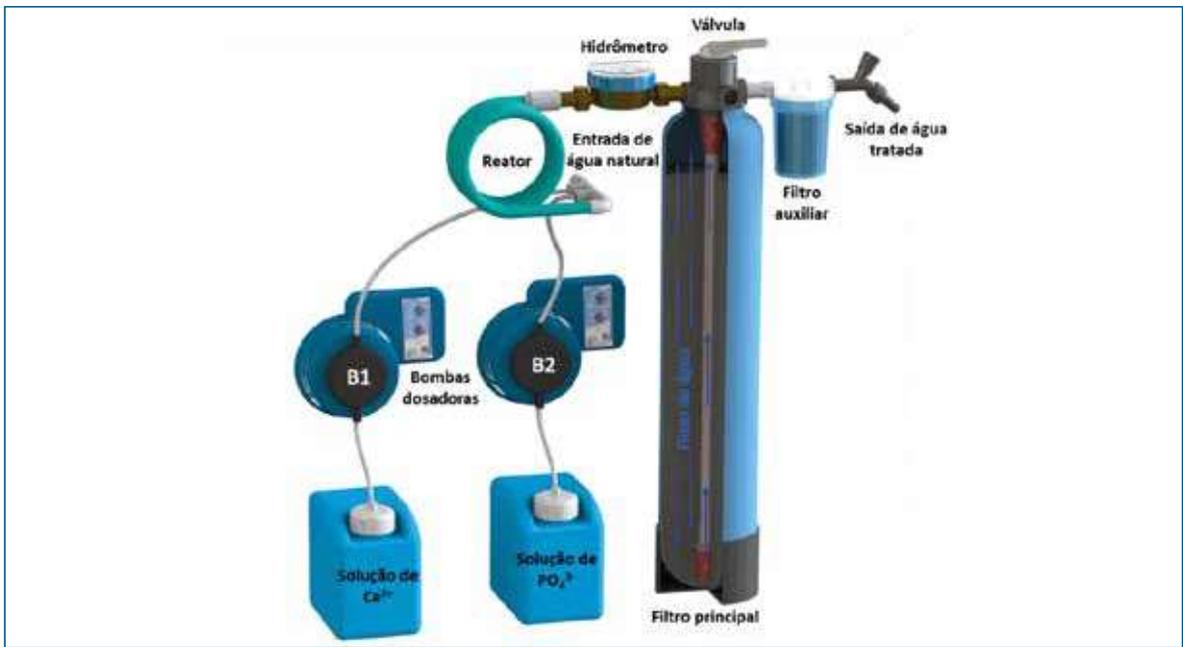


Figura 2 – Ilustração dos sistemas de desfluoretação por adsorção e precipitação por contato FT1 e FT2, montados com 25 kg de carvão ativado de osso.

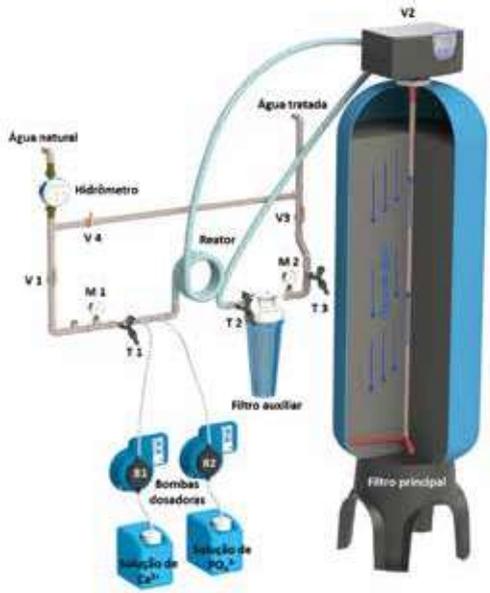


Figura 3 – Ilustração do sistema de desfluoretação por adsorção e precipitação por contato FT3, montado com 235 kg de carvão ativado de osso.

Tabela 3 – Características dos principais componentes dos sistemas de desfluoretação por adsorção e precipitação por contato FT1 e FT2

Componente	Descrição	Função
Bomba dosadora B1	Bomba dosadora de vazão variável (Q: 0-5 L.h ⁻¹)	Dosar a solução de cálcio (Ca ²⁺)
Bomba dosadora B2	Bomba dosadora de vazão variável (Q: 0-5 L.h ⁻¹)	Dosar a solução de fósforo (PO ₄ ³⁻)
Filtro auxiliar	Filtro auxiliar de polipropileno. Grau de filtração de 5 µm.	Reduzir o risco de arraste de materiais particulados
Filtro principal	Tanque de fibra de vidro, com 25 kg de carvão ativado de osso	Responsável pelo processo de desfluoretação por adsorção e precipitação por contato
Hidrômetro	Hidrômetro, vazão mín. de 30 L.h ⁻¹	Monitorar o volume de água tratada
Reator	Mangueira trançada e siliconada (13 mm x 1,5 m)	Misturar os reagentes no processo de precipitação por contato
Solução de Ca ²⁺	Reservatório de 10 ou 20 litros com solução de CaCl ₂	Reagente para o processo de precipitação por contato
Solução de PO ₄ ³⁻	Reservatório de 10 ou 20 L com solução de K ₂ HPO ₄	Reagente para o processo de precipitação por contato
Válvula	Válvula de três vias de acionamento manual	Controlar o fluxo da água nas funções: filtração, retrolavagem e lavagem

Tabela 4 – Descrição e função dos principais componentes do sistema de desfluoretação por adsorção e precipitação por contato FT3

Componente	Descrição	Função
Bomba dosadora B1	Bomba dosadora de vazão variável (Q: 0-5 L.h ⁻¹)	Dosar da solução de cálcio (Ca ²⁺)
Bomba dosadora B2	Bomba dosadora de vazão variável (Q: 0-5 L.h ⁻¹)	Dosar da solução de fósforo (PO ₄ ³⁻)
Filtro auxiliar	Filtro auxiliar de polipropileno, grau de filtração de 50 µm	Reduzir o risco de arraste de materiais particulados
Filtro principal	Tanque de fibra de vidro com 235 kg de carvão ativado de osso.	Responsável pelo processo de desfluoretação por adsorção e precipitação por contato
Hidrômetro	Hidrômetro, vazão mín. de 30 L.h ⁻¹	Monitorar o volume de água tratada
Manômetro M1	Sensor manométrico de glicerina, (0-5 Bar)	Monitorar a pressão da rede de abastecimento para identificar obstruções no sistema de filtração
Manômetro M2	Sensor manométrico de glicerina, (0-5 Bar)	Monitorar a pressão da rede de abastecimento para identificar obstruções no sistema de filtração
Reator	Mangueira flexível tipo KM (32 mm x 3,0 m)	Misturar os reagentes no processo de precipitação por contato
Solução de Ca ²⁺	Reservatório de 10 ou 20 litros com solução de CaCl ₂	Reagente para o processo de precipitação por contato
Solução de PO ₄ ³⁻	Reservatório de 10 ou 20 litros com solução de K ₂ HPO ₄	Reagente para o processo de precipitação por contato
Torneira T1	Torneira tipo jardim (13 mm)	Coletar amostras da água subterrânea natural
Torneira T2	Torneira tipo jardim (13 mm)	Coleta de amostra da água tratada, antes do filtro de polipropileno. Durante procedimentos de retrolavagem e enxágue do filtro principal a torneira deve permanecer aberta para a drenagem de resíduos
Torneira T3	Torneira tipo jardim (13 mm)	Coleta de amostra da água tratada
Válvula V1	Válvula tipo esfera (25 mm)	Controlar a entrada de água para o processo. Deve ser mantida aberta durante o processo
Válvula V2	Válvula de três vias de acionamento manual ou automático	Controlar o fluxo da água nas funções: filtração, retrolavagem e lavagem
Válvula V3	Válvula tipo esfera (25 mm)	Controlar a saída de água tratada. Deve ser mantida aberta durante o processo
Válvula V4	Válvula tipo esfera (25 mm)	Permite a manutenção do fluxo de água na rede quando o Sistema estiver em manutenção.

3.4 Monitoramento da qualidade da água tratada

Durante o período de operação dos diferentes sistemas de desfluoretação foram determinados, continuamente, os valores de concentração de fluoreto, pH, sólidos totais dissolvidos e turbidez. Além desse monitoramento contínuo, periodicamente foram coletadas amostras para a determinação dos seguintes parâmetros de qualidade: alcalinidade por bicarbonatos, alcalinidade por carbonatos, alcalinidade por hidróxidos, alumínio, amônia (nitrogênio amoniacal), cádmio, cálcio, chumbo, cloreto, cobre, condutividade elétrica, cor aparente, cromo total, dureza total, ferro total, fósforo total, magnésio, manganês, monoclórobenceno, potássio, prata, sódio, sulfato, sulfeto de hidrogênio, surfactantes, tolueno e xileno.

Todas as metodologias analíticas e de coleta de amostras seguiram as normas descritas em APHA (2005). Para as análises executadas por laboratórios terceirizados, foram selecionadas empresas acreditadas de acordo com a ABNT NBR ISO/ICE 17025.

A Portaria nº 2.914/2011, de 12 de dezembro de 2011, do Ministério da Saúde, foi utilizada como referência principal para avaliação e interpretação dos parâmetros de qualidade da água tratada pelos sistemas de desfluoretação desenvolvidos. Além disso, os parâmetros de qualidade determinados na NBR 14.908/2004 foram considerados especificamente nos ensaios de extraíveis (ABNT, 2004).

No processamento da informação, além da estatística descritiva, foram utilizadas diferentes ferramentas estatísticas (paramétricas e não paramétricas) e de modelamento matemático, aplicadas através de *softwares* como Microsoft Excel 2000, PAST 1.81, GraphPad InStat[®] 3.0 (32 bit), e SOLO[®] (6.2).

4. Resultados alcançados frente aos objetivos propostos e discussão

4.1 Sistema de desfluoretação de uso doméstico ou escolar

Durante a vigência desse projeto foram construídos ao todo cinco filtros de desfluoretação contendo 6 kg de carvão ativado de osso. A Figura 4 apresenta imagens do local de instalação desses filtros em bebedouros e em uma cozinha do campus de Santa Cruz do Sul da UNISC. Como foram instalados diretamente nos pontos de consumo, a dinâmica de funcionamento (no que se refere ao tempo e vazão de operação) dependeu do usuário, representando assim condições reais de operação. O monitoramento periódico da qualidade da água desses filtros se estendeu de julho de 2013 a agosto de 2016. A Figura 5 apresenta os resultados de monitoramento da concentração de fluoreto na água subterrânea natural e tratada durante o período de

monitoramento dos cinco filtros. Além disso, os gráficos identificam os instantes de manutenção dos filtros, em que esses foram desmontados e o carvão ativado de osso substituído, bem como o limite de fluoreto de acordo com a Portaria nº 2.914/2011 (BRASIL, 2011).



Figura 4 – Imagens dos filtros F1, F2, F3, F4 e F5 instalados em pontos de consumo no Campus da UNISC, em Santa Cruz do Sul, RS.

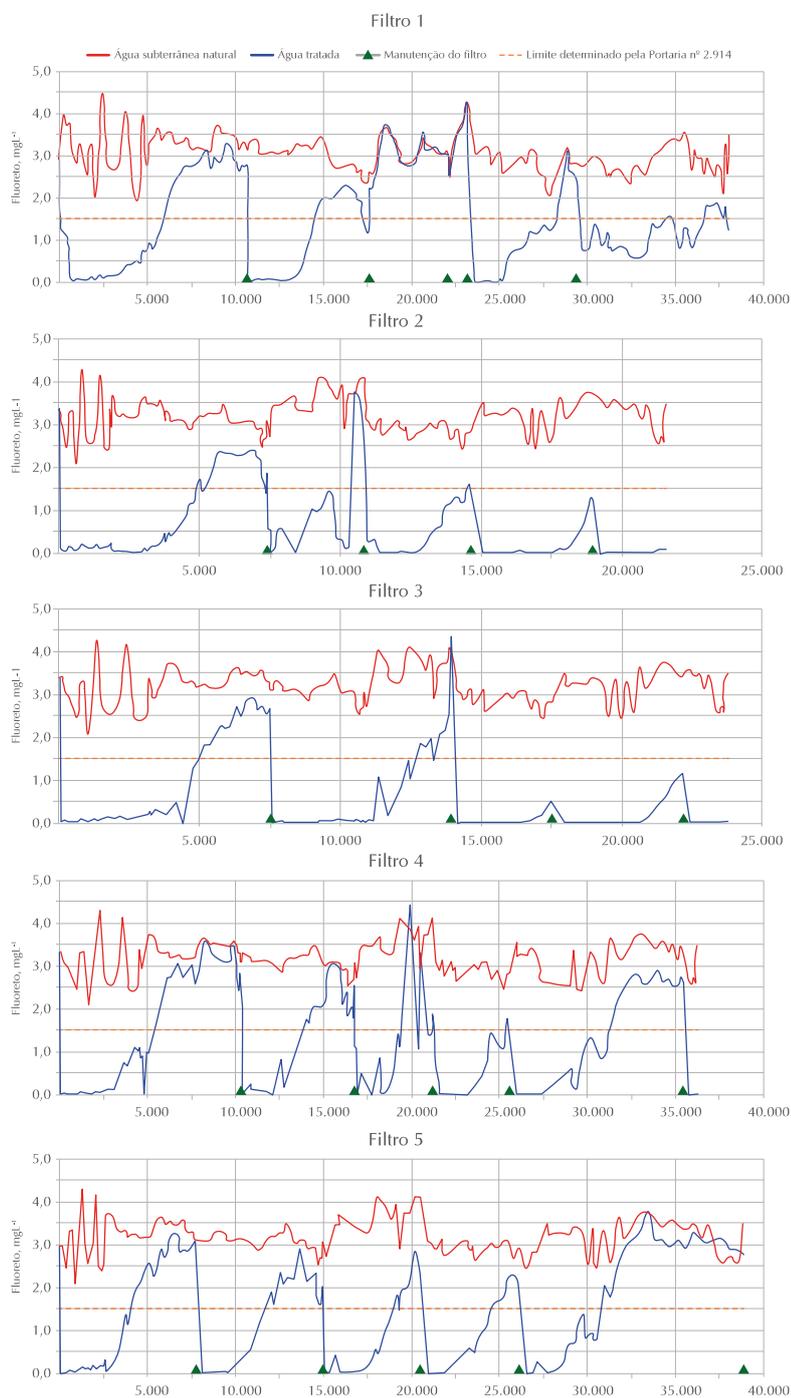


Figura 5 – Resultados do monitoramento da concentração de fluoreto na água subterrânea natural e na água tratada pelos sistemas de desfluoretação instalados no Campus da UNISC, em Santa Cruz do Sul, RS.

Na Tabela 5 são identificados os resultados operacionais de cada um dos sistemas de desfluoretação, durante todo o período de monitoramento, que atingiu até 1.119 dias para o Filtro 1. Nesse período, os filtros trataram volumes entre 21.576 e 38.885 L, resultados esses obtidos pelo Filtro 2 (20,1 L.dia⁻¹) e Filtro 5 (36,5 L.dia⁻¹), respectivamente.

O processo de adsorção em carvão ativado de osso se mostrou eficiente, reduzindo a concentração de fluoreto na água de abastecimento da ordem de 3,2 mg.L⁻¹ para valores médios inferiores a 1,5 mg.L⁻¹, em todos os sistemas avaliados. Apesar de uma redução significativa ($p < 0,05$), é importante justificar os valores elevados de dispersão dos resultados. Essa variação ocorre porque foram considerados todos os resultados obtidos entre cada momento de manutenção, incluindo os valores obtidos acima de 1,5 mg.L⁻¹.

A Tabela 5 apresenta também os resultados individuais de cada ciclo de tratamento. Os ciclos de tratamento foram delimitados entre o início de cada processo e o instante em que a concentração de fluoreto na água tratada atinge valores superiores a 1,5 mg.L⁻¹.

Esses resultados permitem identificar que alguns sistemas trataram em média mais de 5.000 L de água, apresentando valores de capacidade de adsorção superiores a 2.000 mg.kg⁻¹. Cabe lembrar que nos estudos feitos em laboratório a capacidade de adsorção desse mesmo material foi de no máximo 1.330±87 mg.kg⁻¹. A alta eficiência desses sistemas está associada à baixa vazão dos mesmos, sendo que em alguns casos essa permitiu tempos de contato entre a água e o carvão superiores a 400 minutos, em média.

Esses resultados são igualmente superiores aos obtidos em um trabalho desenvolvido anteriormente (LOBO *et al.*, 2013). Nesse caso, a maior capacidade de adsorção está associada, também, à diferença do tamanho de partícula do carvão utilizado pelas duas pesquisas. Conforme comprovado nos testes de laboratório, o carvão ativado de osso utilizado por Lobo *et al.* (2013), com tamanho de partícula de 8 x 24 *mesh*, devido à menor área superficial, apresentou uma capacidade de adsorção inferior em até 35% quando comparado com o carvão de 20 x 60 *mesh*. Outro fator importante se refere à própria estrutura do sistema de filtração, pois as carcaças de filtro utilizadas no presente estudo foram desenvolvidas especificamente para processos de filtração, permitindo uma distribuição mais uniforme da água no meio adsorvente.

Tabela 5 – Resultados operacionais dos cinco sistemas de desfluoretação instalados em pontos de consumo no Campus da UNISC, em Santa Cruz do Sul, RS

Informações		F1	F2	F3	F4	F5
Tempo de operação, dia		1.119	1.072	1.072	1.072	1.065
Número de manutenções		5	4	4	5	5
Volume total de água tratada, L		38.036	21.576	23.763	36.266	38.885
Vazão média, L.dia ⁻¹		34,0	20,1	22,2	33,8	36,5
Taxa de filtração, m ³ .m ⁻² .dia ⁻¹		0,829	0,491	0,541	0,825	0,891
Tempo de contato, min		245	414	375	246	228
Fluoreto na água natural, mg.L ⁻¹		3,02±0,44	3,16±0,55	3,18±0,46	3,17±0,41	3,16±0,41
Fluoretos na água tratada (média geral), mg.L ⁻¹		1,4±1,1	0,6±0,8	0,6±1,0	1,2±1,2	1,3±1,2
Características dos ciclos de desfluoretação	1º Ciclo: volume de água tratada, L	5.934	5.120	4.943	5.451	4.091
	2º Ciclo: volume de água tratada, L	3.850	2.955	5.194	3.436	3.929
	3º Ciclo: volume de água tratada, L	-	3.687	3.573A	2.615	3.999
	4º Ciclo: volume de água tratada, L	5.020	3.893A	4.681A	4.165	4.038
	5º Ciclo: volume de água tratada, L	5.261	-	-	5.651	4.625
	Volume médio tratado ^B , L	5.016	3.921	5.069	4.264	4.136
	Fluoretos na água tratada ^B , L	0,60±0,50	0,40±0,46	0,25±0,40	0,48±0,51	0,46±0,54
	Tempo médio de operação ^B , dia	159±47	213±142	211±62	135±12	128±48
Capacidade de adsorção ^C , mg.kg ⁻¹	2.021	1.804	2.471	1.910	1.820	

Onde: A – Ciclo incompleto (manutenção foi antes da concentração de fluoreto na água tratada atingir 1,5 mg.L⁻¹); B – Considera apenas ciclos de operação completos; C – Capacidade de adsorção até 1,5 mg.L⁻¹

A Tabela 6 apresenta os resultados médios e respectivo desvio-padrão dos demais parâmetros de qualidade monitorados na água tratada, os quais foram determinados ao longo da vida útil dos cinco sistemas de desfluoretação. Como pode ser observado, todos os resultados apresentaram-se dentro dos valores estabelecidos pela Portaria nº 2914/2011 (BRASIL, 2011). As variáveis alumínio, amônia, cádmio, chumbo, etilbenzeno, monoclorobenzeno, prata, sulfeto de hidrogênio, surfactantes, tolueno e xileno, que foram determinadas em um laboratório terceirizado, foram medidas em uma única campanha de coleta e somente no Filtro 3. No entanto, todos os resultados obtidos apresentaram-se abaixo dos valores determinados pela Portaria nº 2914/2011 (BRASIL, 2011). Convém destacar aqui que, na sua maioria, a concentração dessas espécies químicas se apresentou abaixo do limite de detecção dos respectivos métodos analíticos.

Tabela 6 – Resultados obtidos no monitoramento periódico da qualidade da água tratada pelos cinco sistemas de desfluoretação instalados em pontos de consumo no campus da UNISC (média ± desvio-padrão (n))

Parâmetros	VMP	Filtro 1	Filtro 2	Filtro 3	Filtro 4	Filtro 5
Alc. bicarbonatos, mg.L ⁻¹	*	165,8±48,5 (20)	168,2±52,2 (19)	172,5±41,9 (20)	170,1±34,9 (20)	168,2±61,5 (19)
Alc. carbonatos, mg.L ⁻¹	*	45,2±20 (20)	45,1±24,7 (19)	37,3±15,4 (19)	46,4±24,2 (20)	61,5±44,4 (19)
Alc. hidróxidos, mg.L ⁻¹	*	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente
Alumínio total, mg.L ⁻¹	0,2	NR	NR	<0,05 (1)	NR	NR
Amônia (NH ₃), mg.L ⁻¹	1,5	NR	NR	0,2 (1)	NR	NR
Cádmio total, mg.L ⁻¹	0,005	NR	NR	<0,0003 (1)	NR	NR
Cálcio, mg.L ⁻¹	*	0,26±0,4 (22)	0,17±0,39 (21)	0,15±0,26 (21)	0,24±0,13 (18)	0,14±0,26 (19)
Chumbo total, mg.L ⁻¹	0,01	NR	NR	<0,003 (1)	NR	NR
Cloretos, mg.L ⁻¹	250	18,1±5 (20)	17,9±4,8 (18)	18,9±6 (19)	19,0±5,2 (20)	20,6±8,4 (19)
Cobre, mg.L ⁻¹	2	<0,02 (2)	<0,02 (2)	<0,02 (2)	<0,02 (2)	<0,02 (2)
Cond. elétrica, mS.cm ⁻¹	*	543±72 (154)	592±137 (145)	588±152 (144)	577±109 (147)	593±131 (139)
Cor aparente, uH	15	6,1±3,4 (9)	7,0±5,2 (8)	5,3±3,1 (8)	6,3±3,8 (8)	7,8±7,1 (8)
Cromo total, mg.L ⁻¹	0,05	NR	NR	<0,003	NR	NR
Dureza total, mg.L ⁻¹	500	2,6±1,0 (22)	2,5±1,6 (21)	2,4±1,4 (22)	2,3±0,9 (21)	2,0±1,1 (20)
Etilbenzeno, mg.L ⁻¹	0,2	NR	NR	<0,002	NR	NR
Ferro total, mg.L ⁻¹	0,3	0,07±0,09 (21)	0,10±0,14 (21)	0,06±0,06 (22)	0,07±0,06 (22)	0,06±0,06 (19)
Fluoreto, mg.L ⁻¹	1,5	1,44±1,1 (159)	0,55±0,82 (151)	0,55±0,96 (148)	1,22±1,16 (151)	1,32±1,17 (148)
Fósforo total, mg.L ⁻¹	*	0,68±0,76 (22)	0,96±0,69 (21)	1,06±0,84 (20)	0,82±0,84 (22)	0,96±1,32 (20)
Magnésio, mg.L ⁻¹	*	0,47±0,28 (22)	0,51±0,25 (21)	0,51±0,26 (21)	0,44±0,2 (22)	0,43±0,22 (19)
Manganês, mg.L ⁻¹	0,1	0,02±0,02 (22)	0,02±0,02 (21)	0,02±0,02 (21)	0,02±0,02 (22)	0,02±0,02 (19)
Monoclorobenzeno, mg.L ⁻¹	0,12	NR	NR	<0,001	NR	NR
pH	6,0 – 9,5	8,7±0,3 (154)	8,7±0,3 (145)	8,7±0,4 (144)	8,7±0,4 (147)	8,7±0,3 (139)
Potássio, mg.L ⁻¹	*	1,75±7,43 (22)	3,72±9,88 (22)	2,65±9,81 (21)	1,53±4,78 (22)	4,7±14,3 (19)
Prata total, mg.L ⁻¹	*	NR	NR	<0,001	NR	NR
Sódio, mg.L ⁻¹	200	111,2±22,7 (22)	114,4±27,4 (21)	115,2±33,3 (21)	112,8±28,2 (22)	123,5±57,3 (20)
Sólidos totais diss., mg.L ⁻¹	1.000	394±52 (154)	429±99 (145)	420±121 (145)	418±79 (147)	424±107 (141)
Sulfatos, mg.L ⁻¹	250	33±8 (13)	31±10 (13)	31±10 (13)	36±7 (13)	38±10 (13)
Sulfeto hidrogênio, mg.L ⁻¹	0,1	NR	NR	<0,0005 (1)	NR	NR
Surfactantes, mg.L ⁻¹	0,5	NR	NR	<0,03 (1)	NR	NR
Tolueno, mg.L ⁻¹	0,17	NR	NR	<0,001 (1)	NR	NR
Turbidez, µT	5	0,09±0,19 (154)	0,11±0,29 (146)	0,15±1,03 (144)	0,08±0,30 (146)	0,08±0,18 (140)
Xileno total, mg.L ⁻¹	0,3	NR	NR	<0,002 (1)	NR	NR

Onde: VMP – Valor máximo permitido pela Portaria nº 2914/2011 (BRASIL, 2011); * Parâmetros não citados pela Portaria nº 2914/2011 (BRASIL, 2011); NR – Análise não realizada.

4.2 Sistema de desfluoretação para abastecimento coletivo

4.2.1 Instalação e montagem

A Figura 6 apresenta os sistemas de desfluoretação FT1 e FT2, construídos utilizando 25 kg de carvão ativado de osso com diâmetro de partícula de 20 x 60 *mesh*, instalados em uma área de testes, junto ao Laboratório de Hidrologia da UNISC, no Bloco 12 do campus de Santa Cruz do Sul. Na Figura 6A os filtros estão preparados para os testes de adsorção, e na Figura 6B o Filtro FT2 está equipado com as bombas dosadoras das soluções de cálcio e fósforo para os ensaios de precipitação por contato.

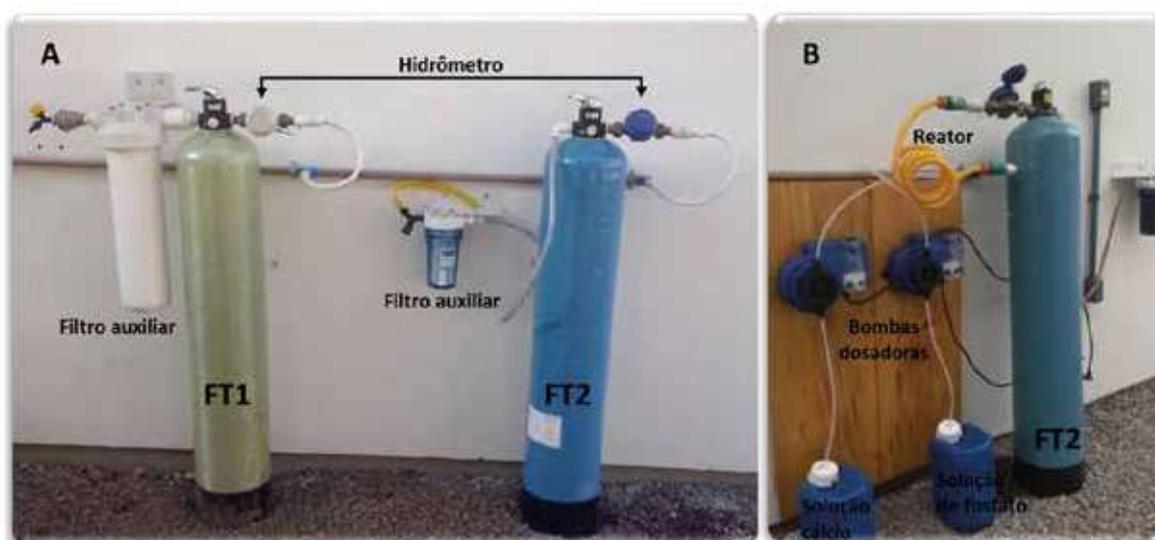


Figura 6 – Imagens dos sistemas de desfluoretação FT1 e FT2, instalados junto ao Laboratório de Hidrologia. A – Filtros FT1 e FT2 preparados para ensaios de adsorção. B – Filtro FT2 equipado com bombas dosadoras, reator e reservatórios para as soluções de cloreto de cálcio e fosfato de potássio para ensaios de precipitação por contato.

Diferente dos filtros testados anteriormente, nos quais a dinâmica de funcionamento (tempo e vazão de operação) dependeu da necessidade de consumo do usuário, nos testes com os sistemas FT1 e FT2 o modo de operação foi contínuo. Assim, quando acionados, esses filtros funcionaram de forma contínua durante cada turno de trabalho. Inicialmente foi imposta uma vazão de operação da ordem de 150 L.h⁻¹, que posteriormente foi alterada até 360 L.h⁻¹. Como esses sistemas de desfluoretação foram os primeiros desenvolvidos para o processo de precipitação por contato, como medida de precaução, a água tratada não foi disponibilizada para consumo.

A Figura 7 ilustra detalhes do processo de montagem e instalação do sistema de desfluoretação FT3, com capacidade para 235 kg de carvão ativado de osso, junto ao Bloco 12 do campus da UNISC em Santa Cruz do Sul, RS. No processo de adsorção a vazão desse sistema foi determinada pela demanda da rede de abastecimento. Já no processo de precipitação por contato, a vazão do sistema foi ajustada para 600 L.h⁻¹.



Figura 7 – Imagens do processo de montagem e instalação do sistema de desfluoretação FT3, no Bloco 12 do campus da UNISC em Santa Cruz do Sul, RS.

4.2.2 Processo de desfluoretação

Os resultados obtidos pelo processo de desfluoretação com o sistema FT1 estão apresentados na Figura 8, que reúne os resultados do monitoramento contínuo da concentração de fluoreto na água tratada, vazão instantânea e resultados pontuais da concentração de fluoreto na água subterrânea natural. As regiões em amarelo e azul indicam o período em que o processo de desfluoretação atuou pelo mecanismo de adsorção e precipitação por contato, respectivamente.

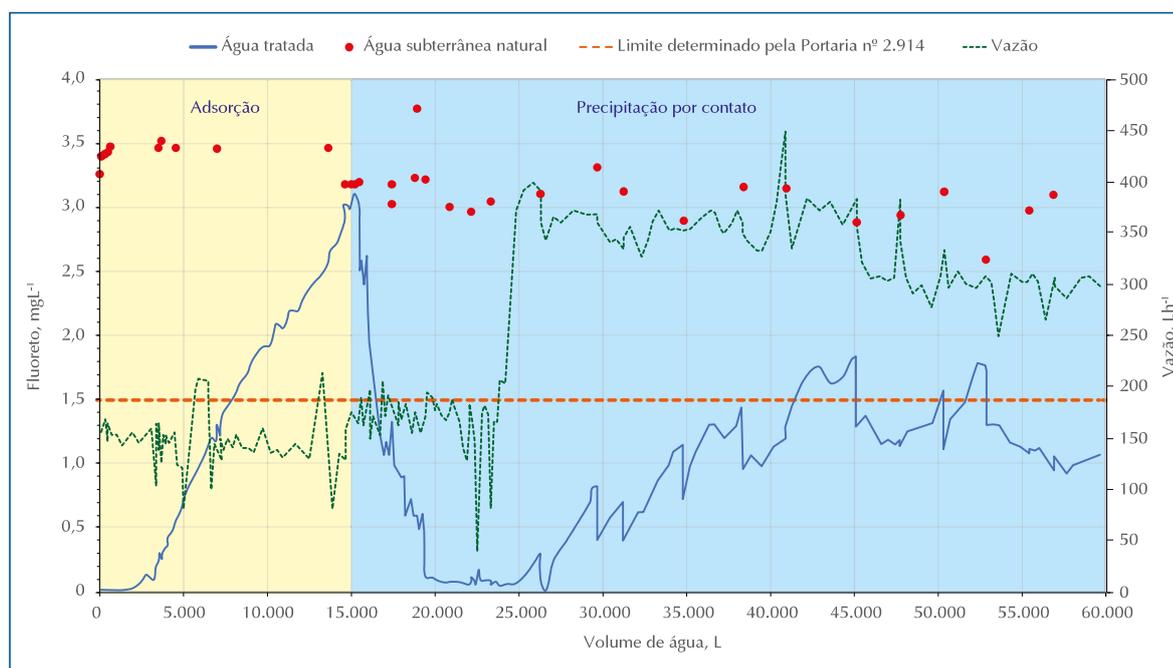
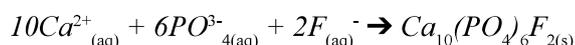


Figura 8 – Resultados do monitoramento da concentração de fluoreto na água subterrânea natural e tratada pelo processo de desfluoretação por adsorção (área amarela) e precipitação por contato (área azul) obtidos pelo sistema FT1.

No que diz respeito aos resultados de adsorção, observa-se que o sistema atingiu seu limite de vida útil após o tratamento de 7.948 litros (vazão média = 148 ± 22 L.h⁻¹), apresentando nesse instante uma capacidade de adsorção de 938 mg.kg⁻¹. Esses valores são inferiores aos apresentados em testes de laboratório (1.194 mg.kg⁻¹), justamente devido ao baixo tempo de contato entre o meio adsorvente e a água, de apenas 9,8 minutos. Esse pequeno tempo de contato, resultante da vazão imposta ao sistema, permitiu identificar os efeitos do tempo de contato (ou vazão) sobre a eficiência do processo, que nessa condição reduziu a capacidade de adsorção em 21%. A concentração de fluoreto na água tratada atingiu valores equivalentes aos da água subterrânea natural (em ao menos 95%) após o tratamento de 14.681 L, determinando

sua capacidade de adsorção máxima em 1.228 mg.kg⁻¹, equivalente aos resultados obtidos nos testes de laboratório.

Com a saturação do carvão ativado de osso, iniciou-se o processo de precipitação por contato. As soluções cálcio e fósforo foram preparadas na concentração de 4.000 mg.L⁻¹ (expresso em massa de Ca²⁺ e PO₄³⁻) utilizando fosfato de potássio dibásico anidro (K₂HPO₄) e cloreto de cálcio dihidratado (CaCl₂.2H₂O), de grau analítico. A vazão de operação foi determinada a partir da estequiometria da reação, considerando a formação de fluorapatita (Ca₁₀(PO₄)₆F₂) como precipitado, conforme descrito em Dahi (1997) e WHO (2006).



Assim, para a remoção de 1 mg de fluoreto deve ser adicionado o equivalente de 10,548 e 14,994 mg de Ca²⁺ e PO₄³⁻, respectivamente. Dessa forma, a vazão dos reagentes foi determinada a partir das seguintes equações:

$$Q_{Ca} = \frac{((Fi - Ft) \times Q) \times 10,548}{C_{PO4}}$$

$$Q_{PO4} = \frac{((Fi - Ft) \times Q) \times 14,994}{C_{PO4}}$$

Onde:

Q_{Ca} – Vazão da solução de cálcio (L.h⁻¹)

Q_{PO4} – Vazão da solução de fosfato (L.h⁻¹)

Fi – Concentração de fluoreto na água subterrânea natural (mg.L⁻¹)

Ft – Concentração de fluoreto (desejável) na água tratada (mg.L⁻¹)

Q – Vazão do sistema de abastecimento (L.h⁻¹)

C_{Ca} – Concentração de cálcio na solução (mg.L⁻¹ de Ca²⁺)

C_{PO4} – Concentração de fosfato na solução (mg.L⁻¹ de PO₄³⁻)

No início do processo de precipitação por contato, a vazão foi ajustada para 180 L.h⁻¹ e dessa forma a vazão das soluções de cálcio e fósforo (ambas de 4.000 mg.L⁻¹) foram determinadas como 1,3 e 1,9 L.h⁻¹, respectivamente. Esses valores foram obtidos considerando a concentração inicial de fluoreto na água subterrânea natural de 3,2 mg.L⁻¹ e a final em 0,4 mg.L⁻¹.

A adição dos reagentes provocou a redução gradual da concentração de fluoreto na água tratada, atingindo valores inferiores a 1,5 mg.L⁻¹ em 16.510 L de água tratada que prosseguiu em queda até níveis inferiores a 0,1 mg.L⁻¹ (em 20.078 L).

Posteriormente a vazão da água foi duplicada para 360 L.h⁻¹ (362±22 L.h⁻¹, n=43), mantendo inalteradas a vazão e a concentração dos reagentes, o que resultou em uma ascensão gradual da concentração de fluoreto, atingindo valores superiores a 1,5 mg.L⁻¹ ao completar 41.478 L de água tratada. Em função disso, a vazão de água foi reduzida para 300 L.h⁻¹ (média após estabilização = 305±22 L.h⁻¹, n=37), e a concentração de fluoreto na água tratada se manteve estável em 1,2±0,2 mg.L⁻¹ até o final do monitoramento do processo, com 59.655 litros de água tratada.

Durante o monitoramento da qualidade da água do sistema de desfluoretação FT1, foi observado que, ao atingir o volume total de tratamento de 22.490 L (7.809 L pelo processo de precipitação por contato) ocorreu uma redução em 77,3% na vazão do sistema. Essa redução de vazão ocorreu devido à obstrução do fluxo de água provocada pelos precipitados formados no interior da coluna de carvão ativado de osso. No entanto, esse problema foi facilmente contornado com a retrolavagem e subsequente enxágue da coluna de carvão. Nesse procedimento de limpeza foram descartados 25 L de água.

Os resultados permitiram identificar 90,1% da composição química do precipitado formado, permitindo inferir que esse material é formado de carbonato de cálcio e por fosfatos de cálcio e flúor, compatível com os produtos do mecanismo de precipitação por contato previstos na literatura (DAHI, 1997 e WHO, 2006).

Os resultados obtidos no sistema de desfluoretação FT2, estão reunidos na Figura 9. Esse processo de desfluoretação iniciou com uma vazão de 180 L.h⁻¹ (172±18 L.h⁻¹, n=20) que foi posteriormente alterada para 300 L.h⁻¹ (284±24 L.h⁻¹, n=5).

O limite de vida útil do processo de adsorção ocorreu após o tratamento de 8.121 L, com capacidade de adsorção de 1.023 mg.kg⁻¹, inferior em 14% ao valor previsto nos ensaios de laboratório. A concentração de fluoreto na água tratada atingiu valores equivalentes ao da água natural (em ao menos 95%) após o tratamento de 28.116 litros. Nessa condição a capacidade de adsorção máxima do carvão ativado de osso foi determinada como 1.516 mg.kg⁻¹.

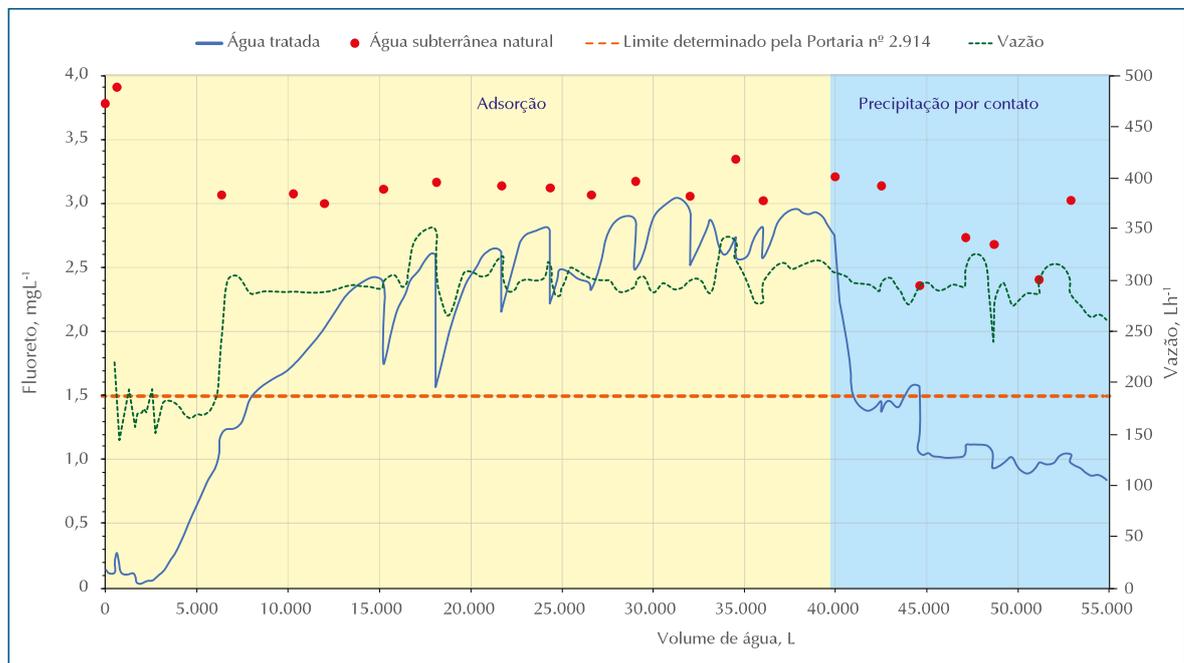


Figura 9 – Resultados do monitoramento da concentração de fluoreto na água subterrânea natural e tratada pelo processo de desfluoretação por adsorção (área amarela) e precipitação por contato (área azul) obtidos pelo sistema FT2.

Com a saturação do carvão ativado de osso, o sistema foi equipado para o processo de desfluoretação por contato. As vazões de água e reagentes foram ajustadas de acordo com os melhores resultados obtidos no sistema FT1, ou seja, 300 L.h⁻¹ de água (290±18 L.h⁻¹, n=33) e as vazões das soluções de cálcio e fósforo foram para 1,3 e 1,9 L.h⁻¹, respectivamente. Esse processo iniciou aos 39.948 L de água tratada, e reduziu gradualmente a concentração de fluoreto até atingir valores inferiores a 1,5 mg.L⁻¹, em 41.032 L, que após algumas oscilações se manteve constante até o final do monitoramento do processo, com 54.837 litros de água tratada.

Com a conclusão dos estudos com os sistemas FT1 e FT2, com 25 kg de carvão, foram iniciados os estudos com o sistema FT3, utilizando 235 kg de carvão ativado de osso. Durante o processo de adsorção, a vazão do sistema foi determinada pela demanda da rede de abastecimento do Bloco 12. Já no processo de precipitação por contato, a vazão do sistema foi ajustada para 600 L.h⁻¹.

Após a instalação, procedeu-se a purga no sistema até que a concentração de sólidos totais dissolvidos fosse inferior a 1.000 mg.L⁻¹, conforme a Portaria nº 2.914/2011 (BRASIL 2011). Para isso foram consumidos 1.000 L de água (vazão de 1.326 L.h⁻¹).

Posteriormente o sistema manteve uma vazão média de $181 \pm 77 \text{ L.h}^{-1}$ ($n=75$) até o final do processo de adsorção. A Figura 10 apresenta os resultados de sólidos totais dissolvidos durante o processo de purga.

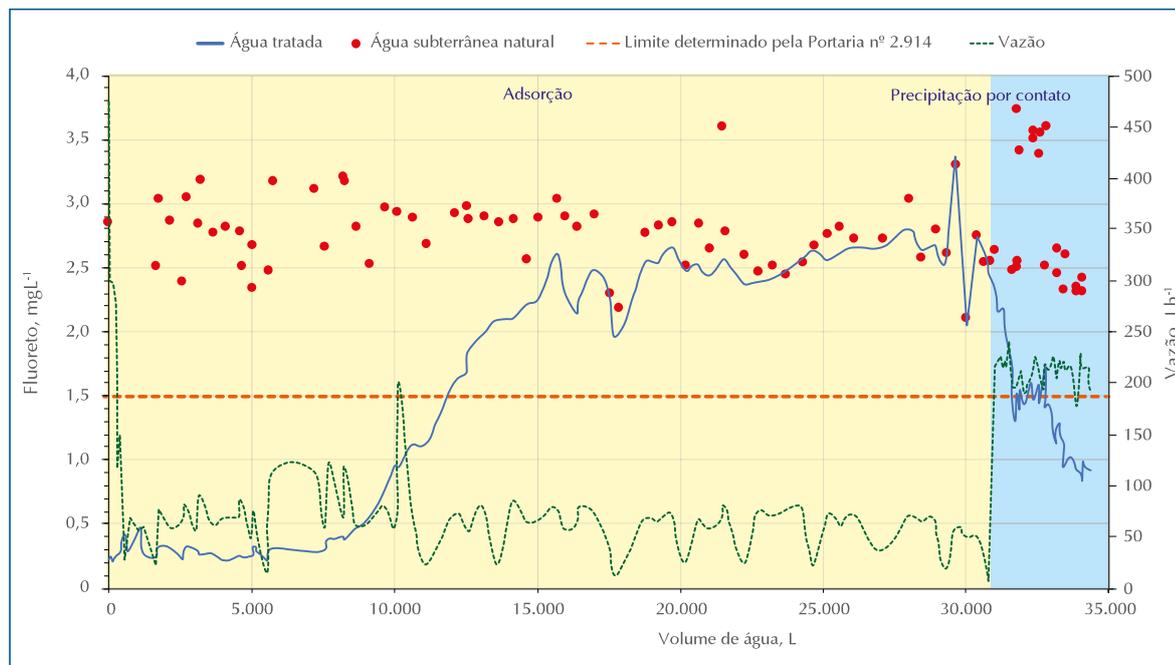


Figura 10 – Resultados do monitoramento da concentração de fluoreto na água subterrânea natural e tratada pelo processo de desfluoretação por adsorção (área amarela) e precipitação por contato (área azul) obtidos pelo sistema FT3.

Quanto à eficiência do processo de adsorção, o sistema atingiu seu limite de vida útil após 119.233 L de água tratada, com capacidade de adsorção determinada em 1.171 mg.kg^{-1} . A concentração de fluoreto na água tratada atingiu valores equivalentes à água subterrânea natural ($2,8 \pm 3$, $n=87$) após o tratamento de 156.972 L. Nessa condição foi possível determinar a capacidade de adsorção máxima em 1.223 mg.kg^{-1} .

Nesse processo optou-se por substituir o fosfato de potássio dibásico anidro (K_2HPO_4) pelo fosfato monobásico de potássio anidro (KH_2PO_4), que apresenta metade da concentração de potássio. Muito embora o uso do fosfato dibásico anidro não tenha comprometido a qualidade da água tratada quanto a concentração de potássio, optou-se por utilizar um reagente de menor efeito sobre esse parâmetro de qualidade. Além disso, o grau de pureza dos reagentes foi alterado de grau analítico (P.A.) para o grau USP (*United States Pharmacopeia*) com o propósito de reduzir custos e utilizar um padrão de reagente que corresponde ao utilizado em sistemas de tratamento de água.

Com o início do processo de precipitação por contato, a vazão do sistema foi ajustada para 600 L.h⁻¹ e a vazão das soluções de cálcio e fósforo foi mantida em 1,3 e 1,9 L.h⁻¹, respectivamente. No entanto, aumentou-se a concentração das soluções para 8.000 mg.L⁻¹, ficando equivalente às condições de operação dos sistemas FT1 e FT2.

A adição dos reagentes provocou uma redução gradual da concentração de fluoreto na água tratada, atingindo valores inferiores a 1,5 mg.L⁻¹ aos 316.184 L de água tratada, que após alguma oscilação prosseguiu em queda até níveis próximos a 1,0 mg.L⁻¹.

Os estudos com esse sistema de filtração, apresentados nesse relatório, encerraram com o tratamento de 343.422 litros de água, em 30 de agosto de 2016. No entanto esse processo continua em uso atualmente.

A Tabela 7 apresenta um comparativo dos resultados apresentados pelos sistemas FT1, FT2 e FT3.

Tabela 7 – Características e principais resultados dos sistemas de desfluoretação FT1, FT2 e FT3

	Informações	Unid.	FT1	FT2	FT3
	Massa de carvão	kg	25	25	235
	Volume da coluna de carvão	m ³	0,041	0,041	0,359
	Volume total de água tratada	L	59.655	54.837	343.422
Adsorção	Volume de água tratada	L	7.948 ^A	8.121 ^A	119.233 ^A
	Fluoreto na água natural	mg.L ⁻¹	3,43±0,04 (9)	3,58±0,46 ^A (3)	2,83±0,25 ^A (27)
	Vazão média	L.h ⁻¹	148±22 (41)	172±18 (20)	181±78 ^C (75)
	Taxa de filtração	m ³ .m ⁻² .h ⁻¹	3,61	4,19	0,71
	Tempo de contato	min	9,8	8,5	75,5
	Fluoreto na água tratada	mg.L ⁻¹	0,48±0,51 ^A (41)	0,43±0,51 ^A (23)	0,42±0,36 ^A (23)
	Capacidade de adsorção ^D	mg.kg ⁻¹	938	1.023	1.173
Precipitação por contato	Volume de água tratada	L	14.528 ^{A,B}	13.787 ^A	27.238 ^A
	Fluoreto na água natural	mg.L ⁻¹	2,94±0,19 (6)	2,78±0,34 (7)	2,78±0,26 (68)
	Vazão média	L.h ⁻¹	305±22 ^A (37)	292±17 ^A (33)	581±34 ^A (39)
	Taxa de filtração	m ³ .m ⁻² .h ⁻¹	7,44	7,12	2,27
	Tempo de contato	min	4,75	4,95	23,38
	Vazão da solução de Ca ²⁺	L.h ⁻¹	1,3 ^A	1,3 ^A	1,3 ^A
	Vazão da solução de PO ₄ ³⁻	L.h ⁻¹	1,9 ^A	1,9 ^A	1,9 ^A
	Fluoreto na água tratada	mg.L ⁻¹	1,22±0,19 (37)	0,98±0,08 (23)	1,27±0,26 (39)

Onde: A – Considerando o volume de água tratada com concentração de fluoreto igual ou inferior a 1,5 mg.L⁻¹; B – Resultados conforme a melhor condição de operação identificada; C – Desconsiderada a vazão de purga do sistema; D – Capacidade de adsorção de até 1,5 mg.L⁻¹.

4.2.3 Qualidade da água tratada

A Tabela 8 apresenta os resultados médios e respectivo desvio-padrão dos parâmetros de qualidade monitorados na água tratada, os quais foram determinados ao longo da vida útil dos sistemas de desfluoretação. Como pode ser observado, todos os resultados apresentaram-se dentro dos valores estabelecidos pela Portaria nº 2.914/2011, do Ministério da Saúde. Como pode ser observado, nenhum dos resultados analíticos apresentados na água tratada compromete sua utilização para o abastecimento público, de acordo com a mesma portaria (BRASIL, 2011), bem como não são evidenciadas a presença de extraíveis, de acordo com a NBR 14908 (ABNT, 2004).

Tabela 8 – Resultados obtidos no monitoramento da qualidade da água tratada pelos sistemas de desfluoretação FT1, FT2 e FT3 (média ± desvio-padrão (n))

Parâmetros	VMP	FT1	FT2	FT3
Alc. bicarbonatos, mg.L ⁻¹	*	170 (1)	84 (1)	238±6 (2)
Alc. carbonatos, mg.L ⁻¹	*	8 (1)	96 (1)	68±1 (2)
Alc. hidróxidos, mg.L ⁻¹	*	ausente (1)	ausente (1)	ausente (1)
Alumínio total, mg.L ⁻¹	0,2	0,05 (1)	<0,03 (1)	<0,03 (1)
Amônia (NH ₃), mg.L ⁻¹	1,5	<0,1 (1)	<0,1 (1)	<0,03 (1)
Cádmio total, mg.L ⁻¹	0,005	<0,0003 (1)	<0,0003 (1)	<0,0003 (1)
Cálcio, mg.L ⁻¹	*	0,20±0,18 (151)	0,14±0,21 (34)	0,42±1,00 (39)
Chumbo total, mg.L ⁻¹	0,01	<0,003 (1)	<0,003 (1)	<0,01 (1)
Cloretos, mg.L ⁻¹	250	51,3 (151)	49,5 (34)	38,6±23,2 (45)
Cobre, mg.L ⁻¹	2	<0,02 (1)	<0,02 (1)	<0,02 (1)
Cond. elétrica, mS.cm ⁻¹	*	669±129 (210)	641±116 (111)	588±73 (128)
Cor aparente, µH	15	6,2 (1)	6,2 (1)	<0,1 (2)
Cromo total, mg.L ⁻¹	0,05	<0,01 (1)	<0,01 (1)	<0,01 (1)
Dureza total, mg.L ⁻¹	500	14,4 (1)	2,9 (1)	1,4±2,8 (2)
Etilbenzeno, mg.L ⁻¹	0,2	<0,002 (1)	<0,002 (1)	<0,002 (1)
Ferro total, mg.L ⁻¹	0,3	<0,02 (1)	<0,02 (1)	<0,02 (2)
Fluoreto, mg.L ⁻¹	1,5	1,33±0,99 (211)	1,57±1,01 (111)	1,45±0,85 (128)
Fósforo total, mg.L ⁻¹	*	0,53±0,26 (151)	0,20±0,13 (34)	0,50±0,59 (42)
Magnésio, mg.L ⁻¹	*	3,44 (1)	<0,02 (1)	0,10±0,06 (2)
Manganês, mg.L ⁻¹	0,1	<0,02 (1)	<0,02 (1)	<0,02 (2)
Monoclorobenzeno, mg.L ⁻¹	0,12	<0,001(1)	<0,001 (1)	<0,001 (1)
pH	6,0 – 9,5	8,1±0,6 (210)	8,5±0,3 (111)	8,8±0,4 (128)
Potássio, mg.L ⁻¹	*	27,3±15,2 (151)	10,8±8,2 (34)	6,0±5,2 (39)
Prata total, mg.L ⁻¹	*	<0,001 (1)	<0,001 (1)	<0,001 (1)
Sódio, mg.L ⁻¹	200	112,9±14,3 (151)	72,0±40,0 (34)	97,7±13,4 (38)
Sólidos totais diss., mg.L ⁻¹	1.000	485±94 (208)	563 (1)	426±53 (128)
Sulfatos, mg.L ⁻¹	250	33,8 (1)	40,0 (1)	21,0±0,5 (2)
Sulfeto hidrogênio, mg.L ⁻¹	0,1	<0,0005 (1)	<0,005 (1)	<0,005 (1)
Surfactantes, mg.L ⁻¹	0,5	<0,03 (1)	<0,1 (1)	<0,1 (1)
Tolueno, mg.L ⁻¹	0,17	0,021 (1)	<0,001 (1)	<0,0003 (1)
Turbidez, µT	5	0,09±0,97 (210)	0,01±0,03 (111)	0,01±0,02 (128)
Xileno total, mg.L ⁻¹	0,3	<0,002 (1)	<0,002 (1)	<0,002 (1)

4.3 Sugestões de dimensionamento e condições de operação

4.3.1 Dimensionamento do processo de adsorção

Os parâmetros-chave para o dimensionamento de um sistema de desfluoretação são: o volume de água consumido diariamente pela população, a concentração inicial de fluoreto na água natural e a capacidade de adsorção teórica do carvão ativado de osso. No entanto, segundo a WHO (2006), a capacidade de adsorção do carvão ativado em condições operacionais pode variar devido às alterações de vazão da água através do meio de filtração. Assim, a capacidade operacional de sistemas de desfluoretação em coluna pode chegar a valores equivalentes a 2/3 da capacidade teórica.

Esse efeito também foi observado nesse estudo, em que foi possível determinar uma correlação significativa entre o tempo de contato e os resultados de capacidade de adsorção. A correção entre a razão da capacidade de adsorção dos sistemas de desfluoretação (Q_a) e os valores obtidos em testes de laboratório (Q_r) com o tempo de contato, foi significativa ($p = 0,0046$), apresentando um coeficiente de correlação (r) de 0,8738. Dessa forma, para auxiliar no dimensionamento dos sistemas de desfluoretação foi adotada a razão Q_a/Q_r como um fator de operação (F_o) para corrigir o efeito do tempo de contato sobre a capacidade de adsorção. Para isso, foi utilizada a equação $F_o = 0,0035 \times T_c + 0,7794$, que corresponde à equação de reta (linha de tendência) do intervalo de tempo de contato entre 8,5 e 250 min.

Além disso, para o dimensionamento do sistema de desfluoretação foram consideradas as seguintes condições de compromisso:

- a) O sistema de filtração deve ser construído com carvão ativado de osso de características equivalentes às utilizadas nessa pesquisa (tamanho de partícula de 20 x 60 *mesh*, densidade de 0,675 g, porosidade de 65% e capacidade de adsorção de 1.194 mg.kg⁻¹).
- b) Concentração de fluoreto na água natural de até 4,0 mg.L⁻¹.
- c) Tempo de contato entre 8,5 e 250 min, sendo 60 minutos como tempo recomendável ($F_o = 1$).

Dessa forma, a Tabela 9 apresenta a memória de cálculo utilizada para a determinação do volume de água tratada por um sistema de desfluoretação por adsorção, utilizando 235 kg de carvão ativado de osso. Nesse modelo, as características da água e do sistema de desfluoretação são as variáveis de entrada, e o modelo retorna a capacidade de abastecimento do sistema (volume de água tratada).

Os resultados do modelo indicaram que no tratamento de água com concentração inicial de fluoreto equivalente a $4,0 \text{ mg.L}^{-1}$, esse sistema produz 83.668 L de água com concentração média de $0,5 \text{ mg.L}^{-1}$.

Esse volume de água tratada seria o suficiente para atender as necessidades de consumo de uma família de 5 pessoas, por um período de até 167 dias, considerando o consumo médio de 100 L por pessoa ao dia. No entanto, se instalado em um ponto de uso, e destinado apenas para consumo humano (2 L por pessoa ao dia), esse sistema pode atender a demanda de um grupo de até 250 pessoas, nesse mesmo período.

Tabela 9 – Dimensionamento do sistema de desfluoretação por adsorção a partir da massa de carvão ativado de osso

	Descrição	Símbolos e equações	Unid.	
Água	Conc. inicial de fluoreto	Fi	mg.L^{-1}	4,00
	Conc. final de fluoreto (média)	Ft	mg.L^{-1}	0,50
Sistema de desfluoretação	Massa de carvão	M	kg	235
	Capacidade de adsorção	Qa	mg.kg^{-1}	1.194
	Porosidade	P		0,65
	Tempo de contato	Tc	min	75,5
	Densidade	d	kg.L^{-1}	0,675
	Volume da coluna	$V_c = M/d$	L	348,15
	Volume mínimo do tanque	$V_{Tq} = V_c \times 1,2$	L	418
	Vazão de operação	$Q_{\max} = (P \times V_c / (T_c / 60))$	L.h^{-1}	179,8
	Fator de operação	Fo		1,04
	Capacidade de adsorção absoluta	$Q_{aa} = (Q_a \times M)$	mg	280.590
	Capacidade de adsorção efetiva	$Q_{ae} = (Q_a \times F_o)$	mg	292.838
	Volume de água tratada	$V_t = Q_{ae} / (F_i - F_t)$	L	83.668

Esse modelo, quando aplicado às características dos sistemas de desfluoretação F5, FT1, FT2 e FT3, apresentou um baixo erro de previsão (entre 1,2 e -5,6%).

Ao final de um ciclo de desfluoretação por adsorção, o carvão ativado saturado pode ser regenerado com a utilização de solução de hidróxido de sódio 1%, seguido de enxágue. Contudo, segundo a WHO (2006) esse procedimento só é economicamente viável em grandes estações de tratamento, sendo que para o uso residencial ou em pequenas comunidades o carvão ativado de osso pode ser convenientemente

utilizado como fertilizante do solo. Nesse estudo, após a saturação do carvão ativado dos sistemas FT1, FT2 e FT3, eles foram conectados aos sistemas de adição de reagentes para o processo de precipitação por contato. Cabe lembrar que nesse processo o carvão ativado de osso atua como catalisador e, para tal, deve estar previamente saturado por fluoreto (usado).

4.3.2 Dimensionamento do processo de precipitação por contato

Quanto ao processo de precipitação por contato, este apresentou características mais robustas que o sistema de desfluoretação por adsorção. Isso foi percebido já nos resultados iniciais, quando o sistema de precipitação por contato permitiu duplicar a vazão de operação do sistema FT1, sem prejuízo à qualidade da água.

Outro fator importante diz respeito ao modo de dimensionamento pois, no processo de precipitação por contato, a capacidade de abastecimento é determinada pela vazão do sistema, e não pela saturação do carvão ativado, como ocorre no mecanismo de adsorção.

Além disso, o mecanismo de precipitação por contato permite controlar com maior precisão a concentração de fluoreto na água tratada, através do ajuste da vazão ou da concentração dos reagentes de cálcio e fósforo. Assim, para a remoção de 1 mg de fluoreto, deve ser adicionado o equivalente a 10,548 e 14,994 mg de Ca^{2+} e PO_4^{3-} , respectivamente, como previamente apontado.

Dessa forma, para o dimensionamento do sistema por precipitação por contato foram consideradas as seguintes condições de compromisso:

- a) O sistema de filtração deve ser construído com carvão ativado de osso de características equivalentes às utilizadas nessa pesquisa (tamanho de partícula de 20 x 60 *mesh*, densidade de 0,675 g e porosidade de 65%), o qual deve estar previamente saturado por fluoreto.
- b) Concentração de fluoreto na água natural de até 4,0 mg.L⁻¹.
- c) Tempo de contato de no mínimo 4,75 min.

A Tabela 10 apresenta a memória de cálculo utilizada para a determinação das dimensões de um sistema de desfluoretação por precipitação por contato, projetado para atender as necessidades de abastecimento de até 100 pessoas (com uma média de consumo de 100 L por pessoa ao dia). Nesse modelo as características da rede de abastecimento são as variáveis de entrada, e o modelo retorna as características operacionais do sistema de desfluoretação.

Tabela 10 – Dimensionamento do sistema de desfluoretação por precipitação por contato em carvão ativado de osso

	Descrição	Símbolos e equações	Unid.	
Rede de abastecimento	Consumidores	N	p	100
	Consumo doméstico	D	L.p ⁻¹ .dia ⁻¹	100
	Vazão de operação (mínima)	Q	L.h ⁻¹	416,7
	Conc. inicial de fluoreto	Fi	mg.L ⁻¹	4,00
	Conc. final de fluoreto (média)	Ft	mg.L ⁻¹	0,50
Sistema de desfluoretação	Tempo de contato	Tc	min	10,0
	Porosidade	P		0,65
	Densidade	d	kg.L ⁻¹	0,675
	Volume da coluna	Vc = Tc x (Q/60)/P	L	50,7
	Volume mínimo do tanque	VTq = Vc x 1,2	L	60,9
	Massa de carvão	M	kg	235
	Concentração da solução de Ca ⁺	C _{Ca}	mg.L ⁻¹	4.000
	Concentração da solução de PO ₄ ³⁻	C _{PO4}	mg.L ⁻¹	4.000
	Vazão de solução de Ca ⁺	Q _{Ca} = (((Fi-Ft) x Q) x 10,548)/C _{Ca}	L.h ⁻¹	3,8
	Vazão de solução de PO ₄ ³⁻	Q _{PO4} = (((Fi-Ft) x Q) x 14,994)/C _{PO4}	L.h ⁻¹	5,5

4.4 Custos de montagem e operação dos sistemas de desfluoretação

Para a determinação dos custos de montagem e manutenção do sistema de desfluoretação foram considerados os principais componentes desses sistemas, orçados no comércio local (Santa Cruz do Sul, RS) em setembro de 2016, como venda direta ao consumidor. Dessa forma, componentes menores (como conexões, adaptadores), mão de obra, energia elétrica e transporte não foram considerados nesse orçamento.

A Tabela 11 apresenta os custos de instalação de dois sistemas de desfluoretação por adsorção. O primeiro, com 6 kg de carvão, está dimensionado para uma vazão de 36 L.dia⁻¹, ideal para instalações em ponto de consumo, apresentando uma capacidade de tratamento de 4.185 L. O segundo sistema de desfluoretação, com 25 kg de carvão, está dimensionado para uma vazão de até 150 L.h⁻¹, com uma capacidade de tratamento de 8.000 L.

Tabela 11 – Custo de instalação de dois sistemas de desfluoretação por adsorção, construídos com 6 e 25 kg de carvão ativado de osso

Componentes	Unit.	Sistema F5		Sistema FT1	
		Quant.	R\$	Quant.	R\$
Carvão ativado de osso	7,00	6	42,00	25	175,00
Crepina inferior 1"	23,00	1	23,00	1	23,00
Filtro auxiliar_7" x 3,4"	60,00	1	60,00	1	60,00
Filtro principal_8" x 18"	225,00	1	225,00	-	0,00
Filtro principal_9" x 48"	374,00	-	0,00	1	374,00
Hidrômetro 3/4"	70,00	1	70,00	1	70,00
Tubo de PVC 1"	5,50	1	5,50	1,5	8,25
Válvula manual 1"	132,00	1	132,00	1	132,00
Total			557,50		842,25

Incluindo os investimentos para a instalação, o custo da água desfluoretada pelo sistema F5 corresponde a R\$ 0,14 por litro. Contudo, como a manutenção desse sistema compreende apenas a substituição do carvão ativado de osso, o custo da água desfluoretada reduz para R\$ 0,01 por litro, se excluído o investimento em capital.

Cabe lembrar que a vazão diária desse sistema permite atender as necessidades de consumo de um grupo com até 18 indivíduos adultos (2 L por pessoa ao dia), por um período de até 116 dias. Em unidades escolares, considerando o consumo de 0,5 L por estudante ao dia (WHO, 2006), esse sistema pode atender as necessidades de consumo de até 70 estudantes, considerando 35 estudantes por turno letivo.

O custo de instalação do sistema FT1 permite determinar o custo da água tratada em R\$ 0,10 por litro, o que, desconsiderando o investimento em capital, corresponde a R\$ 0,02 por litro. A Tabela 12 apresenta os custos de instalação de dois sistemas de desfluoretação por precipitação por contato, que correspondem aos sistemas FT1 e FT3, os quais utilizaram 25 e 235 kg de carvão ativado de osso.

Tabela 12 – Custo de instalação de dois sistemas de desfluoretação por precipitação por contato, construídos com 25 e 235 kg de carvão ativado de osso

Componentes	Unit.	Sistema FT1		Sistema FT3	
		Quant.	R\$	Quant.	R\$
Carvão ativado de osso	7,00	25	175,00	235	1.645,00
Bomba dosadora	800,00	2	1.600,00	2	1.600,00
Crepina inferior 1"	23,00	1	23,00	-	-
Filtro auxiliar_20"	400,00	-	-	1	400,00
Filtro auxiliar_7" x 3,4"	225,00	1	225,00	-	-
Filtro principal_24" x 72"	4.326,96	-	0,00	1	4326,96
Filtro principal_9" x 48"	374,00	1	374,00	-	-
Hidrômetro 1"	300,00	-	-	1	300,00
Hidrômetro 3/4"	70,00	1	70,00	1	70,00
Reator (mangueira de 1")	15,00	-	0,00	3	45,00
Reator (mangueira de 3/4")	4,00	1,5	6,00	-	-
Reservatório de reagentes	25,00	2	50,00	2	50,00
Sensor manométrico de pressão	75,00	2	150,00	2	150,00
Sistema de distribuição e acesso	470,00	-	0,00	1	470,00
Tubo de PVC 1"	5,50	1,5	8,25	2	11,00
Válvula automática e acessórios	1.720,00	-	0,00	1	1720,00
Válvula manual 1"	132,00	1	132,00	1	132,00
Total			2.813,25		10.919,96

Quanto aos custos de manutenção, tomando o sistema FT1 como exemplo, este atuou com uma vazão de 300 L.h⁻¹ no tratamento de água com concentração inicial de fluoreto de 4,0 mg.L⁻¹ e com o objetivo de reduzir para 0,8 mg.L⁻¹. O consumo dos reagentes de cálcio e fósforo corresponderam a 3,3 e 4,8 g.m⁻³, resultando um valor de R\$ 0,20 por m³ de água tratada. Nessa condição de vazão, esse sistema atende as necessidades de consumo de um grupo de até 72 pessoas (100 L por pessoa ao dia).

As dimensões do sistema FT3 permitiram atender necessidades maiores de consumo. A vazão máxima de operação foi de 600 L.h⁻¹, suficiente para abastecer até 144 pessoas. No entanto, de acordo com os resultados de dimensionamento, esse sistema pode suportar uma vazão de até 2.800 L.h⁻¹, sem prejuízo para a qualidade da água.

Dessa forma, os custos de investimento do sistema FT1, para um grupo de 72 pessoas, corresponderiam a um valor de R\$ 39,02 por pessoa. Ao mesmo tempo, o sistema FT3 corresponde a R\$ 75,83/pessoa, para um grupo de 144 pessoas, mas com possibilidade de expandir para uma população de até 672 pessoas (considerando o consumo de 100 L por pessoa ao dia).

4.5 Manual para montagem e operação dos sistemas para desfluoretação de águas de abastecimento

Os resultados obtidos nessa pesquisa foram compilados em um manual, intitulado “Manual prático para montagem e operação dos sistemas para desfluoretação”. Nesse manual estão descritas as instruções de montagem, instalação e uso, advertências de segurança, manutenção, limpeza e demais informações pertinentes de um aparelho para a melhoria da qualidade da água de uso doméstico.

5. Conclusão

Este estudo reúne um importante conjunto de informações sobre a utilização de carvão ativado de osso em processo de desfluoretação de águas naturais para o abastecimento público. Essas informações foram obtidas, na sua maioria, em experimentos práticos em escala-piloto, que permitiram identificar as reais características operacionais de dois mecanismos distintos de desfluoretação.

No que diz respeito aos mecanismos de adsorção e de precipitação por contato, os sistemas desenvolvidos nesse trabalho indicaram diferentes recomendações de uso. Os sistemas de desfluoretação por adsorção apresentaram-se adequados para instalação no ponto de uso, onde a água é utilizada para consumo direto, permitindo determinar um consumo de dois litros por pessoa ao dia, atuando com uma vazão de até 36 L.h⁻¹, com um custo de investimento de aproximadamente R\$ 600,00.

Por sua vez, os resultados apresentados pelo mecanismo de precipitação por contato indicaram esse sistema como adequado para atender a demanda de pequenas redes de abastecimento de água. Os equipamentos de desfluoretação por precipitação por contato atuaram com vazão máxima de 600 L.h⁻¹, quantidade suficiente para atender as necessidades de consumo de 144 pessoas (100 L por pessoa ao dia), com um custo de investimento de aproximadamente R\$ 11.000,00. Contudo, os resultados obtidos permitem inferir que o mesmo equipamento possa suportar vazões de até 2.800 L.h⁻¹, sem prejuízo da qualidade da água.

No que diz respeito aos custos de manutenção, o sistema de adsorção necessita apenas da substituição periódica do carvão ativado de osso, resultando num custo de

aproximadamente R\$ 0,02 por litro de água tratada. Já no processo de precipitação por contato, ocorre o consumo constante de reagentes, e o custo foi determinado em R\$ 0,20 por metro cúbico de água tratada.

Ambos os sistemas de desfluoretação não provocaram nenhuma alteração indesejável na qualidade da água, que pudesse comprometer seu uso para abastecimento público. Da mesma forma, não foram detectados problemas de qualidade provocados por extraíveis, de acordo com a norma NBR 14.908/2004.

Nesse contexto, os resultados obtidos nessa pesquisa vem ao encontro dos objetivos, propostos inicialmente, de desenvolver sistemas para a remoção do excesso de fluoreto de águas subterrâneas, adequando-as ao consumo humano conforme a Portaria nº 2914/2011 do Ministério da Saúde. Os sistemas desenvolvidos constituem uma tecnologia de fácil aplicabilidade, baixo custo de implantação, operação e manutenção, o que contribui na melhoria das condições de vida da população brasileira, especialmente as menos favorecidas.

Por fim, é importante destacar que os grupos de pesquisa em Limnologia e em Sistemas e Processos Industriais da UNISC, continuam trabalhando no aperfeiçoamento dos sistemas de desfluoretação desenvolvidos no contexto dessa pesquisa, bem como na formação de recursos humanos para o gerenciamento desse grave problema de saúde pública.

6. Recomendações para utilização dos resultados pela Funasa e indicativos de custos

O principal produto dessa pesquisa foi o desenvolvimento de dois sistemas distintos de desfluoretação, que possibilitam a desfluoretação parcial de águas naturais até níveis adequados ao consumo humano, conforme a Portaria nº 2.914/2011 do Ministério da Saúde.

Adicionalmente, estão em fase final de elaboração um *software* e um aplicativo para *smartphone*, que servirão de ferramentas de auxílio para o dimensionamento dos sistemas de desfluoretação investigados nesse estudo.

Como anteriormente apontado, no intuito de socializar essa tecnologia para o fornecimento de água potável em diferentes comunidades do Brasil, foi elaborado um Manual para montagem e operação dos sistemas para desfluoretação de águas de abastecimento. Além disso, uma oficina técnica sobre os resultados dessa pesquisa está programada para ocorrer entre os meses de maio e junho de 2017 na UNISC, em Santa Cruz do Sul, RS.

Por fim, salienta-se que a Universidade de Santa Cruz do Sul coloca-se à disposição da Fundação Nacional de Saúde para o auxílio na aplicação prática dos sistemas de desfluoretação desenvolvidos nesta pesquisa.

Referências bibliográficas

American Public Health Association (APHA). **Standard methods for the examination of water & wastewater.** Washington: APHA, ed. 21, p. 1000, 2005.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Norma ABNT NBR 14908:2004 **Aparelho para melhoria da qualidade da água para uso doméstico – Aparelho por Pressão.** Rio de Janeiro, 2004.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Portaria nº 2914, de 12 de dezembro de 2011. Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade.** Diário Oficial União, Brasília, v. 239, p. 39-46, Seção 1, 14 dez. 2011.

COSTA, A. B. *Água & Saúde.* 1. Ed. Santa Cruz do Sul: EDUNISC, 2010.

COSTA, A. B.; LOBO, E. A. **Estudo preliminar do processo de desfluoretação parcial da água utilizando a alumina ativada DD-2.** Anais do XII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. São Paulo: ABRH, v. 3, p. 549-544, 1997.

DAHI, E. **Development of the contact precipitation method for appropriate defluoridation of water.** In: 2nd International Workshop on Fluorosis prevention and defluoridation of water. Nazareth, Ethiopia, p. 19-25, November, 1997.

LARSEN, M. J.; PEARCE, E. I. F. **Defluoridation of drinking water by boiling with brushite and calcite.** Caries Research, v. 36, p. 341-346, 2002.

LOBO, E. A.; COSTA, A. B.; KIRST, A.; MACHADO, E. L.; SOARES, J.; KUNRATH, I. G.; WETZEL, A. P. **Desfluoretação parcial de águas subterrâneas.** In: 6º Caderno de Pesquisa em Engenharia de Saúde Pública/Fundação Nacional de Saúde. Brasília: Funasa, p. 244, 2013.

SAHA, S. **Treatment of aqueous effluent for fluoride removal.** Water Res, v. 27, p. 1347–50, 1993.

World Health Organization (WHO). **Fluoride in drinking-water.** London, p. 134, 2006.

World Health Organization (WHO). **Guidelines for drinking-water quality.** Geneva, 4 ed., p. 541, 2011.