

1 Introdução

Esta ficha informativa resume as tecnologias disponíveis para tratamento de PFAS em matrizes ambientais. Informações adicionais estão disponíveis no Documento de Orientação. As tecnologias disponíveis para tratamento de PFAS são objeto de intensa pesquisa e desenvolvimento e estão em evolução. O *Strategic Environmental Research and Development Program* (SERDP) do Departamento de Defesa dos EUA (SERDP) e o *Environmental Security Technology Certification Program* (ESTCP) fornecem amplo financiamento para pesquisas na área de tecnologias de tratamento de PFAS (<https://www.serdp-estcp.org>). Os projetos SERDP/ESTCP atuais ou recentes estão listados no Guia Técnico. As tecnologias de tratamento descritas são categorizadas por grau de desenvolvimento e histórico de implementação, bem como pela confiança atual na tecnologia com base na literatura revisada por pares, na literatura não revisada por pares validada externamente e no julgamento profissional dos autores do ITRC.

A estabilidade singular e a natureza surfactante das PFAS tornam muitas tecnologias de tratamento convencionais ineficazes, incluindo aquelas que dependem da volatilização de contaminantes em temperatura ambiente (por exemplo, *air stripping* e extração de vapor do solo) ou biorremediação (exemplos: *biosparging*, bioestimulação e bioaumentação). Mesmo tecnologias mais agressivas, como por exemplo tratamento térmico e oxidação química, requerem condições extremas que devem ir além das práticas típicas (ex.: temperaturas elevadas, doses químicas elevadas e pH muito elevado) para serem eficazes na volatilização ou destruição de PFAS. Como muitas tecnologias de tratamento convencionais (além das identificadas neste documento) se mostraram inadequadas, muitas vezes são necessárias novas tecnologias ou combinações inovadoras de tecnologias existentes para tratar PFAS. As aplicações de tratamento de PFAS mais bem-sucedidas contêm uma etapa de concentração ou separação, seguida por uma etapa de descarte ou destruição em uma abordagem envolvendo o uso de um sistema de tratamento.

Tecnologias de Remediação de PFAS: Visão Global

Esta ficha informativa resume “tecnologias implementadas em campo” que têm sido demonstradas em operação em escala total por várias partes em diversos locais, estando bem documentadas na prática ou na literatura revisada por pares.

Esta ficha informativa também introduz “tecnologias de aplicação limitada”, que foram implementadas em casos piloto ou em escala real, em um número limitado de locais por um número limitado de profissionais, e podem não terem sido documentadas na prática ou na literatura revisada por pares. Estão incluídas também “Tecnologias em desenvolvimento”, que são aquelas que estão sendo desenvolvidas por meio de pesquisa em escala laboratorial ou de bancada, mas que ainda não foram demonstradas em campo. Para obter maiores detalhes, consultar a Seção 12, incluindo a Tabela 12-1 do Guia técnico (ver <https://pfas-1.itrcweb.org/>).

As tecnologias de tratamento de água mais comumente implementadas em campo incluem separação/remoção usando carvão ativado granular, resina de troca iônica ou membranas de alta pressão (como por exemplo, osmose reversa [OR]). Os resíduos resultantes (carvão ativado gasto, resinas e concentrado de OR) devem ser gerenciados através de tratamento adicional, destruição ou disposição.

O tratamento de sólidos (ex.: solos, sedimentos) inclui estabilização, incineração, lavagem de solo ou disposição em aterro. A incineração tem recebido atenção recente devido à possível combustão incompleta e geração de subprodutos. Em abril de 2022, o Departamento de Defesa (DOD) impôs uma prorrogação temporária à incineração de materiais contendo PFAS.

O ITRC desenvolveu uma série de fichas informativas que resumem a ciência recente e tecnologias emergentes referentes às PFAS. As informações apresentadas nesta ficha informativa e em outras sobre PFAS encontram-se descritas em maiores detalhes no **ITRC PFAS Technical and Regulatory Guidance Document (Guia Técnico)** (<https://pfas-1.itrcweb.org/>).

Essa ficha foi elaborada visando:

- fornecer uma visão global das tecnologias disponíveis para tratamento de sólidos (solo ou sedimento) e líquidos (água subterrânea, lixiviado ou águas pluviais);
- abordar fatores que influenciam na seleção de tecnologias de tratamento de PFAS;
- apresentar observações específicas referentes ao tratamento de PFAS.

Tecnologias de Tratamento para PFAS *cont.*

Posteriormente, em julho de 2023, a prorrogação temporária foi anulada e a incineração de resíduos contendo PFAS pôde ser considerada como uma alternativa de disposição, sujeita a planejamento e coordenação adicionais (USDOD 2023, Ref# 2852, 2856). Consultar o Manual Técnico Principal para obter maiores informações sobre este tópico. As instalações de disposição de resíduos sólidos e perigosos que são permitidas e estão dispostas a aceitar resíduos contendo PFAS são limitados em número e podem não estar próximas geograficamente, fazendo que o foco recente seja direcionado para o desenvolvimento de tecnologias alternativas de estabilização e destruição *on-site* e *in situ*.

A presença de PFAS em emissões atmosféricas oriundas de chaminés pode ser reduzida pelo controle convencional da poluição do ar ou por tratamento térmico, embora a eficácia dessas soluções não seja bem compreendida. A amostragem de PFAS emitidas de chaminés e a realização de análises adequadas é uma área ativa de pesquisa, que precisará fazer parte da avaliação do tratamento adequado de quaisquer emissões de chaminés que poderão conter PFAS. Os tratamentos mais atuais para emissões atmosféricas de PFAS estão contidos no Manual Técnico Principal.

Fatores que Influenciam na Seleção de Tecnologias

A seleção de uma tecnologia de remediação adequada depende de diversos fatores-chave, incluindo características da área de estudo, disponibilidade de tecnologias de tratamento de eficácia comprovada e o marco regulatório necessário para medir o progresso e a conformidade. Um modelo conceitual da área sendo investigada é fundamental para compreender e apresentar as justificativas adotadas para seleção da tecnologia adotada. Em algumas áreas, pode ser razoável e necessário implementar ações corretivas provisórias para mitigar rotas de exposição completas, com a intenção de aplicar soluções mais robustas e permanentes à medida que estão sendo desenvolvidas.

O desenvolvimento de padrões regulatórios continua e inclui a identificação de PFAS específicas a serem tratadas. Esses valores estão resumidos no arquivo Excel *PFAS Water and Soil Regulatory and Guidance Values Table* (https://pfas-1.itrcweb.org/#1_3).

Apresentamos abaixo um resumo dos fatores-chave que influenciam na seleção de uma tecnologia adequada de remediação de PFAS:

- **Características de PFAS.** A eficácia do tratamento está impactada pela ampla gama de características químicas e físicas de PFAS, como por exemplo, recalcitrância às tecnologias mais usadas, devido à força da ligação carbono-flúor, estado iônico, tipos de grupos iônicos (sulfonato ou carboxilato), comprimento de cadeia e concentração total;
- **Mudanças nas propriedades de PFAS.** Processos que ocorrem naturalmente ou ações passadas / atuais para remediação de outros contaminantes (misturados), como solventes clorados e hidrocarbonetos de petróleo, podem afetar a distribuição e mobilidade de PFAS em águas subterrâneas (McGuire et al. 2014);
- **Outros contaminantes, matéria orgânica e geoquímica.** A presença de outros contaminantes, como por exemplo, carbono orgânico total, matéria orgânica natural, minerais, cátions e ânions pode afetar significativamente a eficácia do tratamento; o pré-tratamento desses outros constituintes pode ser crítico para o processo de remoção de PFAS de forma eficiente;
- **Aceitação pela comunidade.** As partes interessadas, incluindo os membros da comunidade, enfrentam frequentemente *trade-offs* em termos de custo, esforço de limpeza e contaminação residual como parte dos esforços de remediação.

2 Tecnologias de Tratamento de Líquidos Implementadas em Campo

As tecnologias de tratamento de líquidos apresentadas nesta seção podem ser aplicadas a uma variedade de meios impactados por PFAS, incluindo água potável, água subterrânea, água superficial, efluentes ou lixiviados de aterros.

Sorção

A sorção por carvão ativado granular e troca iônica tem se mostrado eficaz em escala total. No caso de certos PFAS, vários parâmetros de influxo de água podem impactar a eficácia e eficiência do processo de sorção. Estes parâmetros incluem pH, força iônica, características e concentrações de outros contaminantes orgânicos (incluindo matéria orgânica de ocorrência natural), íons inorgânicos concorrentes (como: sulfato, nitrato, bicarbonato e cloreto), além de sólidos suspensos ou impurezas potencialmente precipitantes (ex: ferro, manganês e cálcio) que podem prejudicar e degradar o desempenho do material filtrante que está sendo usado.

Etapas de pré-tratamento, como por exemplo, coagulação, precipitação, filtração, ajuste de pH ou remoção de oxidantes, podem ser necessárias para remover constituintes interferentes e otimizar o desempenho do meio sorvente. Certas etapas de pré-tratamento podem resultar em resíduos adicionais. Em geral, os sistemas de remoção de PFAS são posicionados no final do sistema de tratamento, após a remoção de outras substâncias do conjunto de contaminantes para obter um nível de eficiência ideal. Esses sistemas de tratamento são normalmente configurados com vasos *lead-lag* e de sistemas de tratamento redundantes visando permitir operação contínua.

Carvão Ativado Granulado (CAG)

A adsorção por CAG é uma tecnologia de tratamento de água estabelecida que comprovadamente remove PFAS de cadeia longa com eficácia. As PFAS individuais têm diferentes capacidades de adsorção no CAG e tempos de *breakthrough* correspondentes, que são normalmente definidos como o número de volumes de leito tratados antes da detecção no efluente (Eschauzier et al. 2012). A performance de remoção de PFOS pelo CAG é melhor do que de para PFOA, mas ambas as substâncias podem ser efetivamente removidas (McCleaf et al. 2017). Em geral, CAG é menos eficiente para adsorver PFAS de cadeia mais curta, com tempos de *breakthrough* mais menores, mas podem ser tratadas de forma eficaz se a frequência de manutenção é determinada com base no tempo de *breakthrough* desses PFAS de cadeia curta. Sistemas CAG temporários (móveis e montados em *skids*) e permanentes podem ser implantados rapidamente. Já existem vários tipos diferentes de materiais-base para CAG, sendo que os dados mostram que os produtos à base de betume são mais eficazes para remoção de PFAS do que outras formas de CAG, como por exemplo a casca de coco (McNamara et al. 2018; Westreich et al. 2018).

Troca Iônica

As opções de resina de troca iônica para remoção de PFAS incluem resinas descartáveis e regeneráveis. Já foi demonstrado que as resinas de troca iônica têm alta capacidade de remoção de muitas PFAS de cadeia mais curta (Woodard, Berry e Newman 2017). As resinas descartáveis são usadas até que o *breakthrough* ocorra em um patamar pré-estabelecido, sendo então removidas do recipiente e substituídas. As resinas regeneráveis são usadas até o *breakthrough*, mas depois são regeneradas no local usando uma solução regenerativa para restaurar a capacidade de remoção de PFAS da resina. O processo de regeneração gera um resíduo que deve ser gerenciado. Sistemas de troca iônica temporários e permanentes podem ser implantados rapidamente.

Membranas de Alta Pressão

Membranas de alta pressão (nanofiltração [NF] e osmose reversa [OR]) demonstraram ser altamente eficazes na remoção de PFAS (Appleman et al. 2014; Tang et al. 2006; Tang et al. 2007). Nos últimos anos, novos processos químicos e de fabricação de polímeros melhoraram a eficiência, reduziram as pressões operacionais e diminuíram os custos associados à operação de sistemas de membranas de alta pressão. Como resultado, as membranas de alta pressão são cada vez mais utilizadas pela indústria para concentrar ou remover produtos químicos. As membranas de alta pressão são suscetíveis a *fouling* (perda de capacidade de produção) devido ao acúmulo de material na superfície da membrana, portanto, um pré-tratamento eficaz para remover sólidos suspensos é uma essencial para qualquer sistema de membrana de alta pressão. Os rejeitos conterão uma alta concentração de PFAS, sendo necessário o gerenciamento adequado por meio de tratamento, lançamento permitido ou disposição.

Fracionamento de Espuma

O fracionamento de espuma é um processo de separação física que tradicionalmente utiliza ar e turbulência para gerar bolhas que ascendem pela coluna de água para retirar do corpo líquido substâncias anfífilas, como PFAS (Lemlich & Lavi 1961; Lemlich 1962). As PFAS tendem serem adsorvidas na superfície das bolhas à medida que estas ascendem e acumulam-se no topo da coluna na forma de uma espuma concentrada, que são então removidas para tratamento adicional ou disposição. Este processo tem sido implementado em escala total, em campo, em todo o mundo. O fracionamento de espuma é eficaz na remoção de PFOS e PFOA e PFAS de cadeia longa (Burns et al. 2021; Newman 2022; Burns et al. 2022; Smith et al. 2022) até alcançar concentrações de algumas partes por trilhão, mas seu desempenho na remoção de PFAS com menos de seis átomos de carbono perfluorados permanece menos confiável.

Carvão Ativado Coloidal (CAC)

A injeção de CAC em um aquífero tem como objetivo remover os contaminantes em estado de solução que migram nas águas subterrâneas, além de adsorver os contaminantes que apresentam difusão reversa a partir de zonas de menor permeabilidade, reduzindo assim a migração da pluma. O desempenho está sujeito a variáveis geoquímicas, como por exemplo, carbono orgânico dissolvido, presença de ânions e cátions concorrentes e concentrações de outras substâncias contaminantes. O carvão ativado coloidal pode ser injetado usando poços *direct-push* ou verticais instalados na forma de uma grade regular nas zonas de origem, visando imobilizar contaminantes em um transecto perpendicular à pluma para mitigar o fluxo dos contaminantes. O CAC injetado tem sido utilizado com sucesso em projetos na América do Norte, Europa, Oriente Médio e Ásia (ex.: McGregor 2020; Carey et al. 2022). Carey et al. (2022) apresentaram dados de desempenho de 16 projetos CAC em escala de campo, nos quais as concentrações de PFAS em nove dos *sites* foram reduzidas a valores iguais ou inferiores aos níveis de detecção.

3 Tecnologias de Tratamento de Sólidos Implementadas em Campo

As tecnologias nesta seção podem ser aplicadas a uma variedade de meios impactados por PFAS, incluindo solo, sedimentos, lodo ou meios de tratamento usados.

Sorção e Estabilização

A sorção e estabilização podem ser selecionadas com base em uma avaliação específica da área investigada e fornecem uma maneira relativamente rápida e simples de reduzir a migração contínua de contaminantes de zonas-fonte para cursos d'água e águas subterrâneas. Esta abordagem não remove PFAS da área-fonte, mas as imobiliza, reduzindo assim o risco de migração contínua. Com relação ao uso de alguns *amendments* (aditivos), os métodos de teste estabelecidos projetaram/modelaram a estabilidade a longo prazo de PFAS imobilizadas em solos (Stewart e MacFarland 2017). Os aditivos cuja eficácia já foi demonstrada em campo incluem o carvão ativado e materiais compósitos, como por exemplo uma mistura de hidróxido de alumínio, caulim e carbono projetada especificamente para fixar PFAS. Diferentes métodos para introdução do aditivo, como injeção ou mistura *in situ*, podem fornecer resultados diferentes, sendo que o uso desses métodos depende das características geológicas encontradas e dos objetivos de tratamento.

Contenção de Solo

A contenção não está listada como uma tecnologia específica, mas é comumente utilizada para outros contaminantes e pode ser empregada para PFAS dependendo das condições específicas da área. A contenção pode incluir *capping* (cobertura) para evitar infiltração ou exposição, construção de uma *slurry wall* (barreira vertical) ou barreira de isolamento semelhante, adição de meios de sorção para evitar a migração, ou disposição em aterro. As opções de contenção dependerão de considerações específicas da área, da natureza dos materiais contendo PFAS e das exigências regulamentais locais.

Escavação e Disposição

Solos/sólidos contaminados por PFAS podem ser escavados e descartados em um aterro devidamente licenciado. O tratamento de solos escavados (por exemplo, estabilização) pode reduzir a lixiviabilidade de PFAS e deveria ser considerada antes da disposição no aterro. Mudanças constantes nas regulamentações da classificação de PFAS como perigosas podem complicar a implementação desta opção, e os custos de disposição aumentarão se os meios impactados por PFAS precisarem ser descartados como resíduos perigosos/regulamentados. Consultas caso a caso com agências regulamentadoras e proprietários de aterros são provavelmente o melhor curso de ação. Alguns aterros já não aceitam resíduos contendo PFAS.

Lavagem de Solo

A lavagem de solo é um processo de tratamento *ex situ*, *on-site* ou *off-site*, acima do nível do solo, que utiliza separação física e dessorção/extração química para remover a massa de PFAS adsorvida ao solo. Os sistemas de lavagem de solo operam com base no princípio de que a maioria dos contaminantes se liga à fração mais fina do solo, argilas, siltes e matéria orgânica fina, ao invés da fração mais grossa de areia e cascalho. Técnicas físicas de separação por tamanho são usadas para separar as partículas de solo de granulação mais fina das de granulação mais grossa, concentrando e reduzindo assim o volume de solo impactado por PFAS que deve ser posteriormente tratado ou enviado para disposição.

Tecnologias de Tratamento para PFAS *cont.*

Os sistemas de lavagem de solo utilizam uma solução de lavagem geralmente composta de água, porém surfactantes e/ou solventes de extração também podem ser usados para dissolver e concentrar PFAS. A lavagem de solo tem sido usada em escala de campo na Austrália e no Canadá em instalações de tratamento *ex situ*. Os resultados do tratamento de PFAS por lavagem de solo demonstrados nos EUA indicam desempenho variável (ESTCP 2022 Ref#2839; Becker 2022 Ref#2772).

4 Incineração

A incineração é a destruição (mineralização) de produtos químicos utilizando calor. O calor é aplicado diretamente aos sólidos contaminados por PFAS (solo/sedimento/adsorventes usados/resíduos) ou líquidos (água / efluentes / lixiviados / produtos químicos). Os produtos de combustão vaporizados podem ser capturados (precipitação, lavagem úmida de gases) e/ou oxidados ainda mais em temperaturas elevadas. A incineração é uma das poucas tecnologias que podem potencialmente destruir PFAS. No entanto, no momento da publicação dessa ficha, a incineração ainda é objeto de intensa pesquisa para avaliar os seguintes aspectos: temperaturas efetivas de destruição e parâmetros operacionais, o potencial para geração de produtos de combustão incompleta, análises de gases da chaminé, deposição em solo e outros fatores de risco.

5 Tecnologias de Tratamento Limitadas e em Desenvolvimento

Uma revisão das tecnologias de aplicação limitada e em desenvolvimento pode ser encontrada no Manual Técnico, incluindo referências bibliográficas e estudos de caso, quando disponíveis. Estas tecnologias podem avançar no decorrer do tempo para tornarem-se tecnologias implementadas em campo com base na literatura publicada e no grau de confiança na implementação.

6 Referências e Acrônimos

As referências citadas nesta ficha informativa e em outros documentos podem ser encontradas em <https://pfas-1.itrcweb.org/references/>. Números de referência estão incluídos nesta ficha informativa para citações não exclusivas na lista de referência do Guia Técnico.

Os acrônimos utilizados nesta ficha informativa e no Documento de Orientação podem ser encontrados em <https://pfas-1.itrcweb.org/acronyms/>.



Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS) Team Contacts

Sandra Goodrow • New Jersey Department of Environmental Protection
609-940-4164 • Sandra.Goodrow@dep.nj.gov

Kristi Herzer • Vermont Department of Environmental Conservation
802-461-6918 • kristi.herzer@vermont.gov

September 2023



ITRC
1250 H St. NW, Suite 850
Washington, DC 20005
itrcweb.org

